

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS
CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO FRENTE A IMPACTO DE MATERIAL
DEPORTIVO

Autor: LUIS ALEXANDER VILLAMOR CUADRADO

Tutor: JESÚS PERNAS SÁNCHEZ

Director: JOSÉ ALFONSO ARTERO GUERRERO

Leganés, Septiembre 2015

I. RESUMEN

En la actualidad el uso de diferentes plásticos y espumas foam se ha multiplicado en el campo del material deportivo gracias a su baja densidad y su facilidad de amoldarse a infinidad de formas. Otra de las razones por la cual la utilización de estos materiales se está potenciando es debido a las diferentes combinaciones entre sus compuestos, lo cual les confiere diferentes propiedades.

El presente proyecto fin de grado pretende estudiar experimentalmente el comportamiento frente a impacto de material deportivo, y su posterior modelización y análisis numérico mediante software de elementos finitos de código comercial LS-Dyna.

Se realizaron dos ensayos experimentales, uno de caída libre y otro en una torre de caída de peso. Los dos ensayos fueron grabados utilizando una cámara de alta velocidad. A partir de software de análisis de video se consiguieron extraer los datos del ensayo para su posterior comparación con los datos experimentales. Para ello se someterán a estudio las curvas tensión-deformación obtenidas de cada material y ensayo.

II. ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN.....	2
1.1.1 UTILIZACIÓN DE ESPUMAS DE POLIURETANO.....	4
1.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA	5
1.2.1 ETAPAS DE ANÁLISIS FEM.....	6
1.2.2 ELECCIÓN DEL SOFTWARE	7
1.3 OBJETIVOS	9
1.4 CONTENIDO	10
CAPÍTULO 2. MÉTODO DE ENSAYO Y MODELIZACIÓN MATERIAL	11
2.1 EL POLIURETANO.....	12
2.1.1 COMPOSICIÓN DE LOS POLIURETANOS	12
2.2 MÉTODO DE ENSAYO	16
2.2.1 NORMA ASTM D3574 – UNE-EN ISO 8307:2008.....	18
2.3 MODELIZACIÓN DEL MATERIAL	20
2.3.1 OTROS ANÁLISIS FENOMENOLÓGICOS.....	23
CAPÍTULO 3. MÉTODO EXPERIMENTAL Y MATERIALES.....	24
3.1 INTRODUCCIÓN	25
3.2 MATERIALES.....	25
3.2.1 PORON.....	25
3.3 DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES	27
3.3.1 TORRE DE CAÍDA DE PESO.....	27
3.3.2 CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD Y SISTEMA DE ILUMINACIÓN	32
3.4 TIPOS DE ENSAYOS.....	34
3.4.1 MÉTODO DE CÁLCULO EN ENSAYOS A BAJA VELOCIDAD	34
3.4.2 ENSAYO DE IMPACTOS A BAJA VELOCIDAD SOBRE ESPUMA DE POLIURETANO	36
3.4.2.1 ENSAYO DE CAÍDA LIBRE.....	36

3.4.2.2	ENSAYO EN TORRE DE CAÍDA.....	40
3.5	ANÁLISIS VIDEO TRACKING.....	43
3.5.1	PHOTRON FASTCAM VIEWER	44
3.5.2	TRACKER	45
	CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	47
4.1	INTRODUCCIÓN	48
4.2	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VIDEO DE LOS ENSAYOS CON RODAMIENTOS.....	48
4.3	RESULTADOS DE LA TORRE DE CAÍDA	56
4.3.1	FUERZA VS. TIEMPO	57
4.3.2	VELOCIDAD VS. TIEMPO	64
4.3.3	DESPLAZAMIENTO VS. TIEMPO.....	65
4.3.4	ENERGÍA VS. TIEMPO.....	67
4.4	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VIDEO.....	70
4.4.1	DESPLAZAMIENTO	71
4.4.2	VELOCIDAD.....	72
4.4.3	ENERGÍA.....	73
4.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	76
4.5.1	DEFORMACIÓN MÁXIMA	76
4.5.2	VELOCIDAD MÁXIMA DE REBOTE	77
4.5.3	FUERZA MÁXIMA.....	79
	CAPÍTULO 5. MODELIZACIÓN NUMÉRICA.....	80
5.1	INTRODUCCIÓN.....	81
5.2	CONDICIONES DE CONTORNO	81
5.3	GEOMETRÍAS, MALLADO Y MATERIALES.....	86
5.3.1	GEOMETRÍA Y MALLADO	86
5.3.2	MATERIALES.....	87
	CAPÍTULO 6. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	92

6.1 INTRODUCCIÓN	93
6.2 MODELO MATERIAL MOONEY RIVLIN RUBBER	93
6.3 MODELO MATERIAL VISCOUS FOAM	101
6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	106
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	107
7.1 CONCLUSIONES	108
7.2 TRABAJOS FUTUROS	109
7.3 PRESUPUESTO DEL PROYECTO	110
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....	112

III. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución global de la producción de plástico hasta el 2012 (2).....	2
Figura 2. Demanda de los distintos tipos de polímeros plásticos en Europa (1).....	3
Figura 3. Demanda por sector según el tipo de polímeros en Europa (1).....	4
Figura 4. Artículos deportivos y recreativos fabricados a partir del petróleo (3).....	5
Figura 5. Representación del grupo uretano en una cadena polimérica.....	12
Figura 6. Ejemplos de moléculas de isocianato NCO.....	13
Figura 7. Ejemplos de bases hidroxílicas OH.....	14
Figura 8. Detalle de la ficha técnica de los productos Poron (8).....	16
Figura 9. Planteamiento del modelo viscoelástico.....	20
Figura 10. Representación del área bajo la curva de resiliencia (Izq.), y de la tenacidad (Der.).	23
Figura 11. Zonas de protección (8).	25
Figura 12. Dimensiones de las placas Poron.	26
Figura 13. Diferentes tipos de conformados Poron.	27
Figura 14. Torre de caída 6785 Ceast Fractovis (22).	28
Figura 15. Partes principales de la torre de caída de peso Ceast Fractovis 6785 (22)..	30
Figura 16. Representación 3D del percutor utilizado en los ensayos de torre de caída de peso.....	31
Figura 17. Representación esquemática 3D de la colocación de las muestras en la placa soporte.....	31
Figura 18. Funcionamiento del circuito eléctrico con puente de wheatstone (23).....	32
Figura 19. Cámara de alta velocidad Photron Ultima APX-RS.	33
Figura 20. Sistema de iluminación Arrisun 12 plus HMI.	33
Figura 21. Rodamientos de bolas de distintos diámetros	36
Figura 22. Captura del ensayo de impacto de la bola de 30 mm contra la placa Poron.	37
Figura 23. Entorno de trabajo de la Torre de caída de peso Ceast-Fractovis 6785 (22).	40
Figura 24. Gráficas Fuerza-Tiempo del ensayo en la torre de caída de peso de 5 [J]. A la izquierda los valores originales del software de la torre, a la derecha las gráficas desfasadas.	42
Figura 25. Captura del programa con selección del diámetro del impactador para el valor de 1mm x pixel.....	44
Figura 26. Captura del programa con selección del diámetro del impactador para el valor de 0,18776mm x pixel.....	44

Figura 27. Pasos 1,2 y 3 del proceso de análisis de video mediante el software tracker.	45
Figura 28. Pasos 4 del proceso de análisis de video mediante el software tracker.	46
Figura 29. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de velocidad.	51
Figura 30. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de energía de impacto.	51
Figura 31. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de energía absorbida.	51
Figura 32. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de velocidad.	52
Figura 33. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de energía de impacto.	52
Figura 34. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de energía absorbida.	52
Figura 35. Curvas de comportamiento de los rodamientos en el rebote, en función de la altura inicial de caída.	53
Figura 36. Comparativa del porcentaje de absorción de las muestras según el diámetro de los rodamientos en función de las energías de impacto.	54
Figura 37. Curvas del porcentaje de absorción de las muestras según el diámetro de los rodamientos para cada nivel de altura ensayada.	55
Figura 38. Imagen del software de adquisición de datos DAS 4000 de la torre de caída de peso.	56
Figura 39. Gráfica de los registros experimentales de la fuerza ejercida sobre la placa Poron 20236-65.	57
Figura 40. Gráfica de los registros experimentales de la fuerza ejercida sobre la placa Poron XED-09625-65.	57
Figura 41. Gráfica de valores de la tensión ejercida experimentalmente sobre la placa Poron 20236-65.	58
Figura 42. Gráfica de valores de la tensión ejercida experimentalmente sobre la placa Poron XED-09625-65.	58
Figura 43. Tabla Excel efectuada para el proceso de filtrado mediante una serie de Fourier de orden 10.	59
Figura 44. Gráfica de los registros experimentales de la fuerza ejercida filtrados sobre la placa Poron 20236-65.	60
Figura 45. Gráfica de los valores filtrados de la tensión ejercida sobre la placa Poron 20236-65.	60

Figura 46. Gráfica de los registros experimentales de la fuerza ejercida filtrados sobre la placa Poron XED-09625-65.	60
Figura 47. Gráfica de los valores filtrados de la tensión ejercida sobre la placa Poron XED-09625-65.	61
Figura 48. Curva Tensión-Deformación de la placa Poron 20236-65.	61
Figura 49. Curva Tensión-Deformación de la placa Poron XED-09625-65.	62
Figura 50. Tendencia de la pendiente E de la placa Poron 20236-65.	62
Figura 51. Tendencia de la pendiente E de la placa Poron XED-09625-65.	63
Figura 52. Representación del rango de la velocidad vs. el tiempo que soporta el Poron 20236-65.	64
Figura 53. Representación del rango de la velocidad vs. el tiempo que soporta el Poron XED-09625-65.	64
Figura 54. Representación del rango del desplazamiento vs. el tiempo que soporta el Poron 20236-65.	65
Figura 55. Representación del rango del desplazamiento vs. el tiempo que soporta el Poron XED-09625-65.	65
Figura 56. Gráfica de valores de la deformación ejercida experimentalmente sobre la placa Poron 20236-65.	66
Figura 57. Gráfica de valores de la deformación ejercida experimentalmente sobre la placa Poron XED-09625-65.	66
Figura 58. Representación del rango de energías vs. el tiempo que soporta el Poron 20236-65.	67
Figura 59. Representación del rango de energías vs. el tiempo que soporta el Poron XED-09625-65.	67
Figura 60. Gráfico comparativo de la cantidad de energía absorbida por cada material, y porcentaje promedio de absorción de la energía de impacto.	68
Figura 61. Línea de tendencia promedio de absorción de impactos de las muestras.	69
Figura 62. Representación de los valores de aceleración obtenidos del programa tracker para cada rango de energía.	70
Figura 63. Representación de los Desplazamientos.	71
Figura 64. Representación de las velocidades.	72
Figura 65. Representación de las energías.	73
Figura 66. Representación de la deformación máxima vs. la energía de impacto.	76
Figura 67. Representación del tiempo transcurrido hasta la deformación máxima vs. la energía de impacto.	77

Figura 68. Representación de la velocidad máxima de rebote vs. la energía de impacto.	78
Figura 69. Representación del tiempo transcurrido hasta la velocidad máxima de rebote vs. la energía de impacto.	78
Figura 70. Representación de la fuerza máxima vs. la energía de impacto.	79
Figura 71. Captura de la tarjeta "Load_gravity_part".	82
Figura 72 Captura de la tarjeta "Hourglass".	83
Figura 73. Captura de la tarjeta "Contact_Automatic_Surface_to_Surface".	84
Figura 74. Captura de la tarjeta "Contact_Interior".	84
Figura 75. Esquema del ensayo de caída libre con sus condiciones de contorno.	85
Figura 76. Geometría del Impactador	86
Figura 77. Geometría placa Poron 20236-65	87
Figura 78. Gráficas de energía absorbida por el material en función de A y B. Simulaciones con bola de 40mm de diámetro desde 2 m ($v_i = -6260 \text{ mm/s}$) y 5 julios.	89
Figura 79. Tabla con valores típicos en N,mm,s para el material "Viscous_foam".	91
Figura 80. Representación de las tensiones de Von Mises en el corte transversal del Poron 20236-65, al incidir la bola de 30mm.	94
Figura 81. Representación de las tensiones de Von Mises en el corte transversal del Poron 20236-65, al incidir la bola de 40mm.	96
Figura 82. Representación de las tensiones de Von Mises en el corte transversal del Poron XED 09626-65, al incidir la bola de 30mm.	97
Figura 83. Representación de las tensiones de Von Mises en el corte transversal del Poron XED 09626-65, al incidir la bola de 40mm.	98
Figura 84. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron 20236-65 en los distintos impactos de la bola de 30mm.	99
Figura 85. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron 20236-65 en los distintos impactos de la bola de 40mm.	99
Figura 86. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron XED 09625-65 en los distintos impactos de la bola de 30mm.	100
Figura 87. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron XED 09625-65 en los distintos impactos de la bola de 40mm.	100
Figura 88. Representación de las tensiones de Von Mises en vista isométrica del Poron 20236-65, en el impacto del percutor sobre él.	102
Figura 89. Representación de las tensiones de Von Mises en vista isométrica del Poron XED 09625-65, en el impacto del percutor sobre él.	104

Figura 90. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron 20235-65 en cada energía simulada.	105
Figura 91. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron XED 09625-65 en cada energía simulada.....	105

IV. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Unidades definidas para el programa LS-DYNA.	8
Tabla 2. Propiedades de las probetas Poron 20236-65.	26
Tabla 3. Propiedades de las probetas Poron XED-09625-65.	26
Tabla 4. Especificaciones técnicas de la torre de caída Ceast-Fractovis 6785.....	29
Tabla 5. Velocidades de impacto teóricas para las distintas alturas.	38
Tabla 6. Energías de impacto teóricas para los distintos diámetros y alturas.	38
Tabla 7. Esquema de los ensayos realizados sobre las muestras.	41
Tabla 8. Valores de ensayo de caída libre con bola de 30 mm sobre Poron 20236-65.	48
Tabla 9. Valores de ensayo de caída libre con bola de 40 mm sobre Poron 20236-65.	49
Tabla 10. Valores de la energía cinética en el impacto (Eci), energía potencial en el rebote (Epr), energía elástica de la placa (Ee) y porcentaje de absorción total del material Poron 20236-65.	49
Tabla 11. Valores de ensayo de caída libre con bola de 30 mm sobre Poron XED-09625-65.	49
Tabla 12. Valores de ensayo de caída libre con bola de 40 mm sobre Poron XED-09625-65.	50
Tabla 13. Valores de la energía cinética en el impacto (Eci), energía potencial en el rebote (Epr), energía elástica de la placa (Ee) y porcentaje de absorción total del material Poron XED-09625-65.	50
Tabla 14. Propiedades de las muestras ensayadas.	63
Tabla 15. Datos de salida "Database_ASCII_option".	85
Tabla 16. Propiedades del material tipo rígido del impactador y los rodamientos de bolas.	88
Tabla 17. Propiedades del material tipo "mooney_rivlin_rubber" de las muestras.	90
Tabla 18. Propiedades del material tipo "viscous_foam" de las muestras.	91
Tabla 19. Presupuesto del proyecto.	111



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

En las últimas décadas, el uso de materiales plásticos y sus derivados se ha incrementado considerablemente en todas las áreas, sobre todo tras la reciente expansión tecnológica del continente asiático. A la cabeza se encuentra China como máximo productor mundial (entorno al 25%), y en el cuarto puesto se encuentra el resto de Asia (16%) excluyendo a Japón (4,5%) (1).

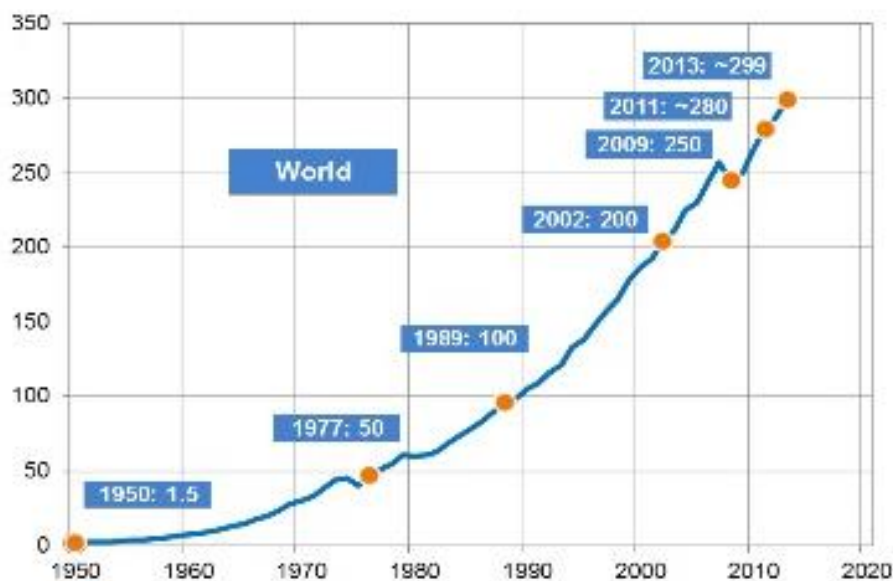


Figura 1. Evolución global de la producción de plástico hasta el 2012 (2).

Debido al aumento de la demanda y a las nuevas áreas de desarrollo, la industria de los plásticos crece un 6% de media cada año (Figura 1). En el año 2014 la producción anual de plásticos superó las 310 megatoneladas. Pese a estos datos, el consumo de petróleo que requiere tal producción no llega al 4%, y con la aparición de nuevos materiales ecológicos y biodegradables, se prevé que este porcentaje disminuya en los próximos años.

La amplia gama de materiales plásticos y las diferentes propiedades que pueden presentar, hacen que el desarrollo de la industria plástica esté en expansión. Entre las propiedades y características de la mayoría de los plásticos se encuentran: poseen baja densidad, son buenos aislantes térmicos y eléctricos, son resistentes a la corrosión, tienen gran resistencia química, son impermeables, son fáciles de moldear y tienen un bajo coste de producción.

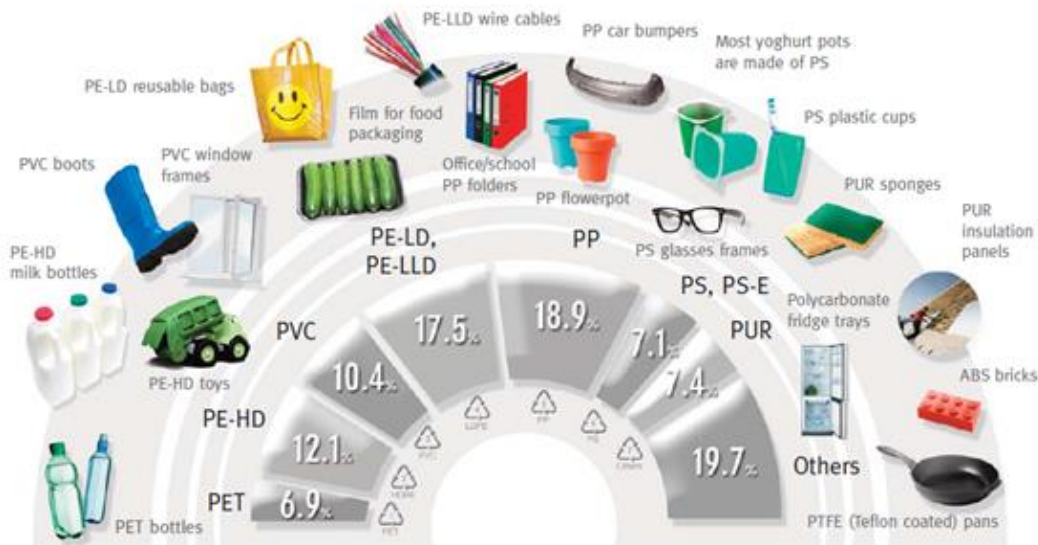


Figura 2. Demanda de los distintos tipos de polímeros plásticos en Europa (1).

El desarrollo de nuevos compuestos plásticos ha supuesto la creación de materiales más ligeros y versátiles con multitud de posibles aplicaciones. Por ejemplo, los plásticos de ingeniería o termoplásticos técnicos como el nylon o poliformaldehído, tienen mejores propiedades mecánicas, una elevada estabilidad dimensional y mayor resistencia al calor y al impacto, por lo que pueden usarse para reemplazar piezas de maquinaria en sectores como el del automóvil: ruedas, engranes, revestimientos, cajas, protecciones, etc... De la misma manera, en las últimas dos décadas el uso y fabricación de materiales compuestos se encuentra en auge. Un material compuesto es el resultado de la unión de dos o más materiales distinguibles físicamente y capaces de separarlos mecánicamente. Muchos de estos materiales compuestos contienen un derivado plástico como constituyente principal o como aglutinante. Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos son superiores a las que poseen sus elementos por separado. Normalmente estas propiedades hacen que el peso de los materiales compuestos sea inferior en comparación con el uso de materiales tradicionales como el acero o aluminio, extendiendo su utilización en muchos campos de ingeniería.

Distinguiendo por sectores con mayor demanda de productos plásticos, estos son el sector de envases y empaquetado, el sector de la construcción, el sector automovilístico, el sector eléctrico y electrónico y el sector agrícola. Los electrodomésticos, el mobiliario, el deporte y la seguridad y salud, son otros mercados donde los plásticos tienen un papel importante.

En este proyecto fin de grado nos centraremos en el uso de los poliuretanos, más concretamente en el marco del material deportivo (englobado en el siguiente gráfico en el apartado “otros” *Figura 3*).

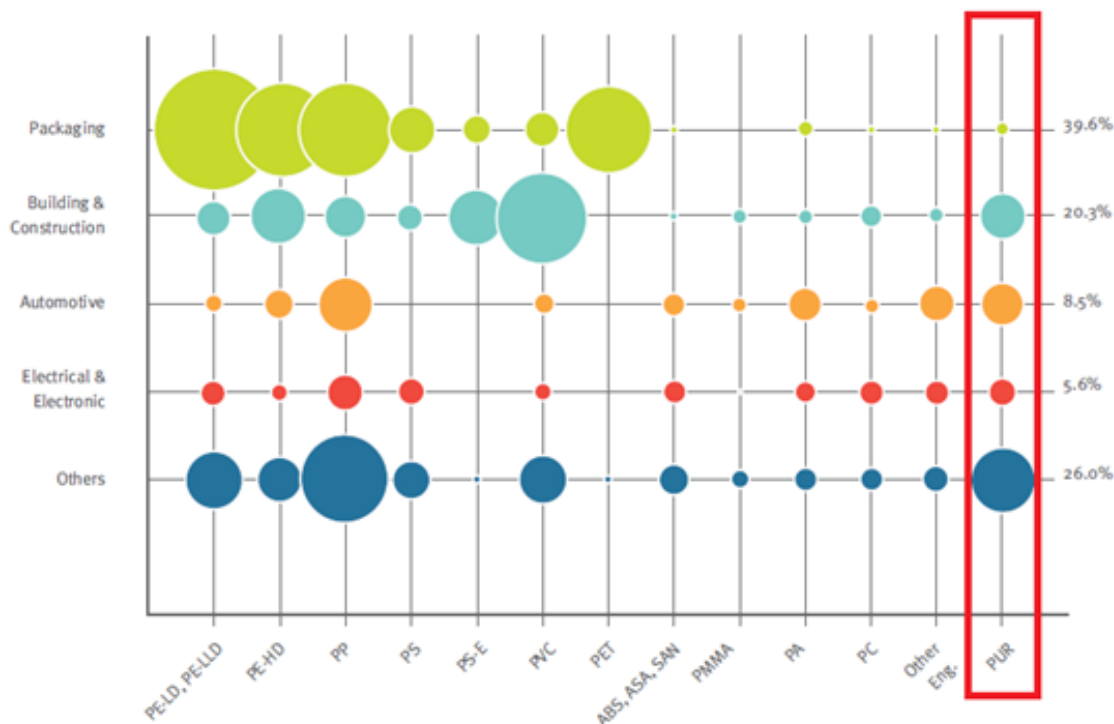


Figura 3. Demanda por sector según el tipo de polímeros en Europa (1).

1.1.1 UTILIZACIÓN DE ESPUMAS DE POLIURETANO

En general, la producción global de los plásticos poliuretanos ha aumentado más del doble en menos de 15 años, desde los 10 millones de toneladas en el año 2000 hasta los 21 millones en 2014. El gran abanico de combinaciones de compuestos y aplicaciones de este tipo de polímeros plásticos originan que cada día se continúen descubriendo distintas variedades.

Alguna de esas aplicaciones de espumas de poliuretanos aparecen en la Figura 4.

Pelotas de golf	Silbatos	Mochilas	Discos de hockey
Trajes térmicos para el agua	Cascos para conducir motocicletas	Dardos	Hieleras
Paracaídas	(Carrocerías de carritos de playa)	Tiendas para acampar	Redes para pescar
Mesas para jugar con naipes	Juegos de damas	Cojines para estadios	Botas para excursionismo
Carrocerías de carritos de golf	Tableros de ajedrez	Pinturas para aplicar con los dedos	Frisbees
Ropa para calentamiento	Pantaloncillos cortos	Equipo para clima adverso	Botas para pescar
Raquetas de ping-pong	Zapatos para tenis	Plantillas	Mascarillas para bucear
Balsas	Palas	Visores	Uñas para tocar guitarra
Uniformes	Señuelos	Recubrimientos de albercas	Pelotas de playa
Fonógrafos	Balones de volibol	Techos vinílicos para autos	Gafas para el sol
Portaequipajes	Sacos de dormir	Hieleras	Correas para perros
Zapatos para correr	Carrocerías de autos deportivos	Chalecos salvavidas	Dados
Dominós	Pelotas de tenis	Cintas de audio	Pértigas para saltar
Rompevientos	Sillas reclinables	Aviones a escala	Acuarios
Velas	Repelentes de insectos	Patines en línea	

Figura 4. Artículos deportivos y recreativos fabricados a partir del petróleo (3).

Las espumas de poliuretano son un elemento indispensable en cualquier dispositivo moderno de protección deportiva. La mayoría de los artículos que incluyen estas espumas, tienen una configuración tipo sándwich con una superficie exterior de plástico más rígido o fibra de carbono: en cascos, espinilleras, plantillas, rodilleras, o coderas entre otros.

La función de estas espumas en general es absorber los golpes, y no transferir dichos esfuerzos a las zonas que cubre. Esto reduce significativamente las lesiones del usuario. Además, la ligereza de las espumas les dota de una buena adaptabilidad al cuerpo, aumentando la comodidad frente a otros productos absorbentes similares, como las espumas EVA.

1.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA

El uso de programas de resolución mediante técnicas de simulación por ordenador, supone un ahorro de costes importante y hace posible la realización de ensayos no reproducibles en el laboratorio.

Para la simulación por ordenador se usará un programa fundamentado en el procedimiento de resolución de problemas del método de los elementos finitos, o más conocido por sus siglas en inglés FEM. Este método resuelve el problema físico planteado de tal forma que se divide el sistema global en regiones más pequeñas. Este problema físico está definido por ecuaciones diferenciales relacionadas por variables independientes. Al reformular las ecuaciones del sistema original al simplificado también se produce un cambio de variables. Esto da lugar a un sistema de “N” ecuaciones, siendo

“N” un número entero y finito. Cuanto mayor sea el número utilizado de ecuaciones (“N”), se obtendrá una mejor aproximación del caso con la realidad (4).

Las ecuaciones diferenciales que emplea el FEM, relaciona entre sí los nodos de la malla. Con este método se logra obtener una aproximación del comportamiento real del entorno nodal. Por esta razón, no se puede garantizar los valores de las variables fuera de la región mallada.

1.2.1 ETAPAS DE ANÁLISIS FEM

El objetivo principal del análisis por elementos finitos es encontrar la solución de problemas complicados sustituyéndolos por un conjunto de problemas más simples. Debido a la complejidad que aparece al analizar ciertos problemas se hace imprescindible la utilización del MEF. De esta manera se sustituye del sistema de ecuaciones diferenciales que representan los problemas de la naturaleza, la solución continua, exacta y en la mayoría de los casos imposible, por una solución discontinua o discreta, es decir, aproximada.

Todo análisis mediante códigos comerciales basados en el método de los elementos finitos se puede dividir en tres fases:

$$\text{Análisis MEF} \begin{cases} \text{Pre – procesado} \\ \text{Cálculo} \\ \text{Post – procesado} \end{cases}$$

- Pre-procesado:

En esta fase se define el problema continuo que se va a resolver. Es muy importante conocer el significado físico del problema para recrear correctamente la geometría, introducir las propiedades del material, las cargas, las condiciones de contorno, etc., ya que de las hipótesis realizadas en esta fase dependerá el resultado final del modelo.

El medio continuo se divide en un número finito de elementos llamados nodos. Este proceso es conocido como discretización o mallado, y consiste en definir el comportamiento de cada nodo y la relación entre ellos mediante una serie de ecuaciones: las funciones de forma. Es necesario efectuar un análisis de sensibilidad de la malla para obtener un mallado óptimo y asegurar que la solución del procesamiento del programa es correcto.

- Cálculo:

Una vez establecidas las pautas de resolución del problema en el pre-procesado, el software obtendrá una solución. Para ello, podemos distinguir entre dos tipos de cálculo de resultados: implícito y explícito.

En este estudio se usará una resolución mediante método explícito, muy útil en problemas de ámbito energético y modelos dinámicos, donde se transfiere una gran cantidad de energía en un pequeño intervalo de tiempo, como por ejemplo en detonaciones e impactos.

La solución del modelo virtual está vinculada a la calidad del mallado y a la definición correcta de las variables como vimos en el apartado anterior, y también a la capacidad de memoria y procesamiento del sistema de procesamiento de datos del que se disponga.

- Post-procesado:

Después de que se alcance la solución al problema establecido, los programas devuelven una gran cantidad de información obtenida del proceso. Toda esa información ha tenido que ser requerida previamente en el pre-procesado. Esta información es primordial para la obtención de conclusiones del estudio. Por esto, es significativo conocer la clase de información que podemos obtener del programa y la manera de recopilación que nos ofrece, ya sea en gráficas, historiogramas o tablas de resultados. También es importante recordar que los datos adquiridos en el post-procesado servirán para validar o no el modelo que se ha simulado, y estos valdrán a su vez para responder a la consecución de los objetivos planteados inicialmente.

1.2.2 ELECCIÓN DEL SOFTWARE

A la hora de elegir un software de elementos finitos, debemos conocer el tipo de problema que se va a simular. Como se mencionó anteriormente, el modelo de elementos finitos se preparará para la resolución explícita de impactos a bajas velocidades.

Existe una gran variedad de programas de resolución mediante FEM explícito. Los más conocidos son: *ANSYS*, *ABAQUS/EXPLICIT* y *LS-DYNA*. Casi todos los programas poseen una serie de fichas o aplicaciones específicas, que están divididas en módulos que se adquieren en función de las necesidades de uso.

El programa utilizado en este trabajo fin de grado es el *LS-Dyna*. Este software es capaz de reproducir una amplia variedad de eventos físicos. Consta de dos partes fundamentales: el diseño de la simulación con el *LS-PrePost*, y el cálculo de resultados con el *LS-Dyna Manager*.

Las unidades de conversión que se utilizarán para las propiedades del programa serán milímetros, segundos, toneladas y sus derivadas (*Tabla 1*).

Unidades	Nombre	Símbolo
Distancia	Milímetros	[mm]
Tiempo	Segundos	[s]
Masa	Toneladas	[Tn]
Densidad	Toneladas/milímetro cúbico	[Tn/mm ³]
Velocidad	Milímetros/segundo	[mm/s]
Aceleración	Milímetros/segundo cuadrado	[mm/s ²]
Fuerza	Newtons	[N]
Energía	Newtons milímetros	[N·mm]
Tensión	Mega Pascales	[Tn/(s ² ·mm)]

Tabla 1. Unidades definidas para el programa LS-Dyna.

De esta manera se simplifica el problema con el fin de ahorrar gasto computacional.

Una ventaja del programa *LS-Dyna* es que posee herramientas de abort de simulación para evitar valores erróneos de cálculo, y con ello pérdida de tiempo de resolución.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente proyecto fin de grado es analizar el comportamiento frente a impacto de un material deportivo de tipo espuma. Para ello se han realizado una serie de pruebas experimentales sobre las espumas con el fin comparar sus capacidades de absorción de energía.

Se realizaron dos tipos de ensayos experimentales: impacto de caída libre con rodamientos de bolas, e impacto en torre de caída de peso. En ambos ensayos se utilizaron distintas variaciones en algún parámetro que representase un cambio en la energía de impacto. De esta manera, en los test de caída libre se modificó la altura de caída, y en las pruebas en la torre de caída se cambiaron las energías de ensayo. Para la correcta obtención y validación de los datos recopilados, se efectuaron 3 ensayos para cada nivel de altura o energía.

Los propósitos de estos experimentos era la obtención de las propiedades del material a partir del análisis de los resultados experimentales para su posterior simulación numérica por medio de un software de elementos finitos.

De esta forma se pretende desarrollar un modelo numérico que sea apto para pronosticar de manera fidedigna el comportamiento del material, sin la necesidad de realizar costosos ensayos experimentales. Para ello se estudiarán y desarrollarán una serie de pautas sobre distintos tipos de material que sean capaces de reproducir fielmente la deformación y la energía que sufre ante el impacto experimental.

El software de elementos finitos utilizado para alcanzar este objetivo es el código comercial *LS-Dyna®*.

1.4 CONTENIDO

Este trabajo fin de grado se ha dividido en 7 capítulos, el primero de los cuales es este, en el que se recoge la motivación, una breve descripción del método de elementos finitos especificando el software específico *LS-Dyna* utilizado en este proyecto, y los diferentes objetivos que se pretenden lograr.

En el segundo capítulo se realiza una breve introducción de los polímeros de poliuretano, el modelo teórico usado para el material, la norma que rige los ensayos realizados y otros tipos de ensayos realizados sobre material deportivo y espumas de poliuretano.

En el tercer capítulo se explican las finalidades de los ensayos, y se describen los ensayos experimentales que se han realizado, así como los materiales utilizados para la consecución de estos. También se detallan los diferentes programas de análisis de video utilizados.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados obtenidos en los dos tipos de ensayos experimentales. Se realiza una comparación de parámetros, y se analizan los resultados de los softwares de video utilizados, así como su validez como método de adquisición de datos.

En el capítulo cinco se describe la modelización numérica. Se describen los diferentes pasos para la consecución de los modelos propuestos. Por último en este capítulo se simularán estos modelos.

En el sexto capítulo se detallan los resultados de cada modelo simulado mediante el software específico *LS-Dyna*, analizando los resultados y la validez de los modelos materiales simulados.

En el séptimo capítulo se recogen las conclusiones de este trabajo, extraídas de los resultados experimentales y las simulaciones numéricas. Además se abordan futuras líneas de trabajo y se presenta el presupuesto del proyecto.

Finalmente se incluye la bibliografía consultada para la realización de este proyecto fin de grado.



CAPÍTULO 2

MÉTODO DE ENSAYO Y MODELIZACIÓN MATERIAL

2.1 EL POLIURETANO

A la hora de practicar deporte, ya sea como pasatiempo o de manera profesional, siempre se busca el confort de todo el equipamiento. La demanda e implantación de materiales cómodos y ligeros ha aumentado debido al éxito que ha generado distintos tipos de materiales con estas características como el PVC, EVA, PE, ABS, TPU, termoplásticos, caucho, composites, entre otros. La utilización del poliuretano proporciona una reducción de peso que asegura la comodidad, y además posee unas propiedades mecánicas y estructurales que garantizan su durabilidad y la seguridad del usuario.

El material que someteremos a estudio en este trabajo fin de grado es el Poron XRD. Este material es una espuma de poliuretano termoplástico, formado al hacer reaccionar dos componentes: un polioliol y un diisocianato. A continuación se describirá brevemente la composición básica de los poliuretanos, con el fin de entender las diferentes propiedades que pueden presentar estos polímeros.

2.1.1 COMPOSICIÓN DE LOS POLIURETANOS

Un poliuretano (PU) es un polímero que se obtiene tras la reacción de un compuesto polihidroxílico con un diisocianato. Las propiedades físicas y químicas de los poliuretanos varían dentro de un gran rango, dependiendo del monómero constituyente y de las condiciones de la reacción de conformación. Para la creación de los distintos tipos de poliuretanos, existe una gran variedad de productos que mediante un proceso de condensación con transferencia de átomos de hidrogeno reaccionan formando cadenas poliméricas unidas entre sí por grupos uretano (*Figura 5*). En esta reacción se produce una especie de polimerización con reordenamiento (5).

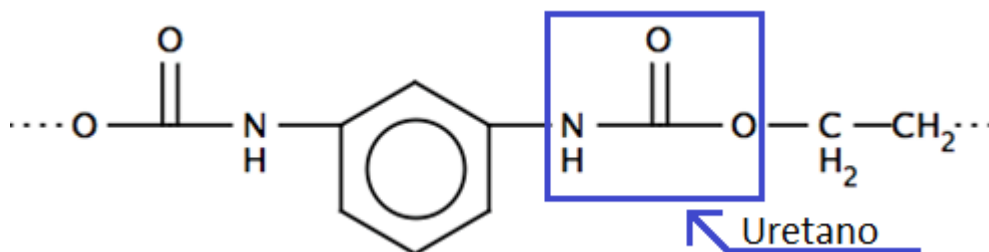


Figura 5. Representación del grupo uretano en una cadena polimérica.

A continuación se detallarán los distintos compuestos integrantes en la formación de poliuretanos.

- Los isocianatos son productos de partida de multitud de procesos químicos. Son compuestos con una reactividad química muy elevada frente a compuestos que poseen hidrógenos activos. Por este motivo, la mayoría de las reacciones que se producen con este grupo funcional son exotérmicas, y en ella se suele liberar dióxido de carbono (CO_2). Este proceso de liberación del CO_2 facilita la formación de espumas, ya que este gas se aloja en el interior del polímero formando burbujas distribuidas de manera uniforme. Entre otras características peligrosas que pueden presentar, estos compuestos son altamente tóxicos, corrosivos e inflamables.

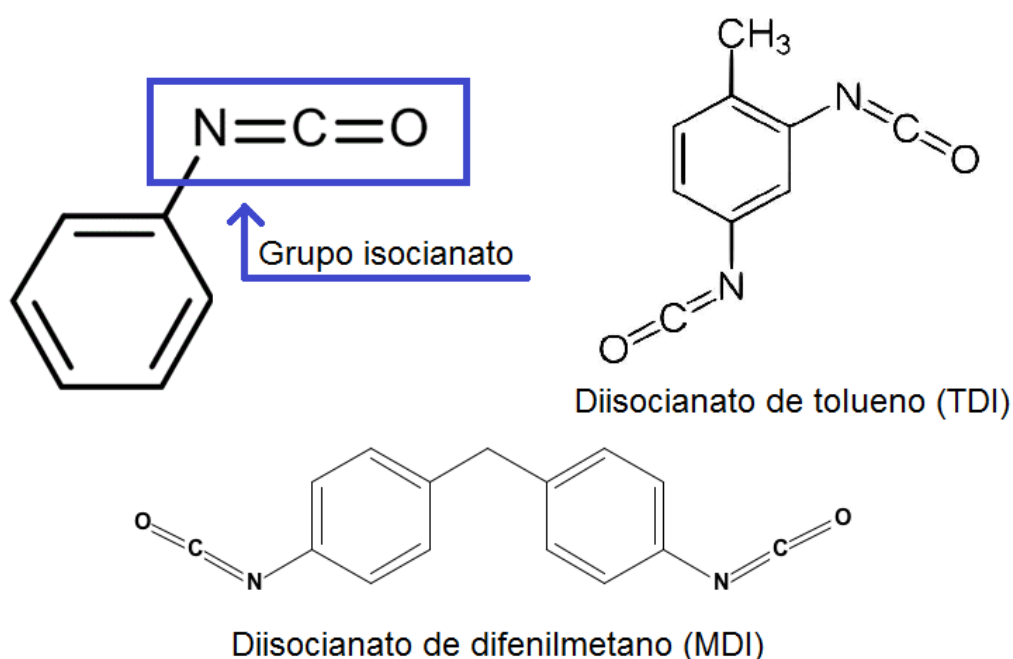


Figura 6. Ejemplos de moléculas de isocianato NCO.

En la Figura 6 se observan algunos ejemplos de las moléculas más utilizadas de isocianato, aparecen los diisocianatos de tolueno y de difenilmetano. Estos compuestos constituyen las dos clases de espumas de poliuretano (6). El diisocianato de difenilmetano (MDI) es el grupo principal en la obtención de espumas rígidas, típicas de aislamientos y recubrimientos, es decir, de poliuretanos termoestables. El diisocianato de tolueno (TDI) es comúnmente utilizado en su forma de isómero (2,4 ó 2,6) para la producción de espumas flexibles termoplásticas, como la que se trata en este proyecto.

- Las bases hidroxílicas son compuestos formados por un átomo de oxígeno y otro de hidrogeno (OH), grupo característico de (poli)alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos (*Figura 7*). Aunque en la reacción de formación del poliuretano el grupo más reactivo es el isocianato, son los polioles los que determinan las propiedades finales. Existe una amplia gama de distintos polioles, que ha convertido esta familia en la más versátil de los materiales plásticos.

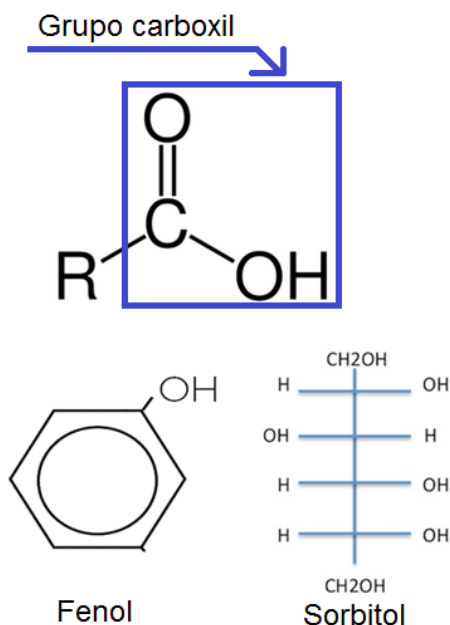


Figura 7. Ejemplos de bases hidroxílicas OH.

- Por último, los catalizadores se utilizan para regular la velocidad de reacción y controlar el proceso de curación.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el proceso de reacción del poliuretano es el grado de contaminación de estos compuestos. Mientras que el isocianato siempre deriva de fuentes petroquímicas, el polirol tiene la capacidad de ser biobasado en algunas aplicaciones y puede ser generado a partir de aceites vegetales (NOP: Natural Oil Polyols) extraídos del ricino, la soja o el girasol, lo que reduce las emisiones asociadas al calentamiento global y la energía necesaria para ser sintetizado (7).

Dependiendo de la estructura química de los poliuretanos, estos se clasifican en dos grupos según su comportamiento frente a la temperatura:

- Poliuretanos termoestables:

Los plásticos de este tipo degradan antes de fluir, es decir, cuando estos materiales se han llegado a solidificar se convierten en rígidos y no vuelven a fundirse. La razón de tal comportamiento es que al elevarse la temperatura, la estructura interna se compacta más haciendo al polímero más resistente hasta que llega a degradarse. Como la reacción de curado (polimerización cruzada mediante reactivos endurecedores, que al reaccionar con los grupos de polioles y con los grupos OH interiores forman redes muy resistentes) es irreversible, este tipo de plástico poliuretano no puede ser reciclado. Las propiedades de estos polímeros son su resistencia a los impactos, resistencia a altas temperaturas y su insolubilidad. Debido a estas características, se utilizan principalmente como recubrimientos y aislantes (térmicos y acústicos).

- Poliuretanos termoplásticos (TPU):

El Poron, que es el material que se ha estudiado en este trabajo, se encuentra dentro de esta categoría.

Este tipo de poliuretanos fluyen antes de degradar, a diferencia de los termoestables, estos plásticos se convierten en líquido cuando se calientan, y se endurecen cuando se enfrían por debajo de su temperatura de transición vítrea, por lo que suelen ser reciclables. Básicamente, es un polímero elastomérico lineal, que puede ser conformado por procesos similares a los termoplásticos comunes como: moldeo por soplado, termoformación, calandrado, moldeo por inyección o moldeo por extrusión. Se caracterizan por conservar sus propiedades mecánicas a bajas temperaturas, su elasticidad, su buena capacidad de amortiguación y su alta resistencia a la abrasión, la tracción, al desgaste, al desgarre y al oxígeno. Además, su posible combinación con diferentes tipos de aditivos les dota de propiedades especiales, como mayor dureza o flexibilidad.

Entre sus aplicaciones habituales destaca su uso como elastómeros, pinturas, adhesivos, suelas de calzado, fibras textiles, sellantes, componentes de automóvil, etc...

2.2 MÉTODO DE ENSAYO

En este trabajo fin de grado se ha estudiado la respuesta ante impactos de los materiales Poron con usos deportivos. Estos impactos se han realizado a baja velocidad, con el fin de estudiar el comportamiento de las muestras ante este tipo de cargas dinámicas. En los impactos de baja velocidad que se han ejecutado, la duración del contacto debe ser lo suficientemente prolongada para que la respuesta dinámica estructural de las muestras absorba mayor energía.

Para la realización del estudio, previamente se debe consultar la norma específica que validará los resultados obtenidos en el ensayo sean los deseados. En la ficha de venta de los productos Poron, se puede apreciar que la norma que define el ensayo efectuado sobre estos materiales es la ASTM D3574, como se puede ver en la Figura 8, y que se explicará en el próximo apartado.

PORON® XRD™ Extreme Impact Protection – Physical Properties

PROPERTY	TEST METHOD	PRODUCT				
*Density, lb./ft³ Specific Gravity Tolerance, %	ASTM D 3574-95 Test A	9	12	15	20	25
		0.14	0.19	0.24	0.32	0.40
		± 10				
*Standard Thickness		See Product Availability				
Tolerance, %		± 10				
Standard Color		65 - Vivid Yellow				
Air Permeability	Internal using Gurley Densometer	Open Cell - Breathable				
*Compression Set, % max.	ASTM D 3574 Test D @ 158°F (70°C)	< 10				
*Compression Force Deflection, psi, kPa)	0.2"/min. Strain Rate Force Measured @ 25% Deflection	1.1 - 3.4 (8 - 23)	1.5 - 5.5 (10 - 38)	4 - 9 (28 - 62)	5 - 12 (34 - 83)	10 - 20 (69 - 138)
Hardness, Durometer	Shore "O"	10	19	32	**	
Hydrolysis Resistance, Compression Set, % Max	ASTM D 3574 Test J / Test D after autoclaved 5 hrs @ 250°F (121°C)	**				
Resilience, Shore Instrument Resiliometer, avg (Ball Rebound Tester)	ASTM D 2632-96, Vertical Rebound	**				
Water Vapor Transfer, Typical g/ft²/24hrs (g/m²/24hrs)	Sample Thickness, inches (mm)	0.158 (4.0)	0.118 (3.0)	0.118 (3.0)	**	
	Based on ASTM E96-00 Upright / 37°C / 0% RH	4150	3400	3100	**	
	Leakage - Inverted	Yes	Yes	Yes	**	
Water Absorption, % Wt Gain	Based on ASTM D 570 - 2hr water immersion @ room temperature	Typical Value 10				
Skin Contact	Primary Skin Irritation - FHSA. Based on ISO 10993-10 (2002), ISO 10993-12 (2007), ISO/IEC 17025 (2005)	Negligible Irritant. Primary Irritation Index = 0				
Tear Strength, pli, min. (kN/m)	ASTM D 624 Die C	4.5 (0.8)	5 (0.9)	5 (0.9)	10 (1.8)	14 (2.5)
*Tensile Elongation, % min.	ASTM D 3574 Test E	> 145				
*Tensile Strength, psi, min. (kPa)	ASTM D 3574 Test E	30 (207)	45 (310)	70 (483)	100 (689)	140 (965)
Restricted Substances Compliance	Based on Adidas-Salomon policy for control and monitoring of hazardous substances.	Pass				
Chemical Resistance		PORON Cushioning Materials are unaffected by mild organic acids and bases. They show modest swelling with oils and greases and other linear hydrocarbons. Strongly polar solvents will greatly swell PORON Materials. In most cases, physical properties recover to a great extent as the solvents evaporate.				

Figura 8. Detalle de la ficha técnica de los productos Poron (8).

Debido la existencia de multitud de aplicaciones que pueden darse a las espumas de poliuretano dentro del ámbito de material deportivo, hay un gran número de ensayos tipificados para la normalización y optimización de estos dentro de un marco regulado. Entre sus usos más frecuentes se encuentran el de protector frente a impactos o de plantilla para calzado:

Los test más comunes realizados a las plantillas de calzado son para evaluar la atenuación del choque, es decir, cuantificar la energía de impacto y su amortiguación. Este tipo de estudios aparece reflejado en los trabajos realizados por Stefan Schwanitz y Stephan Odenwald entre otros, (9) y (10).

Dentro de un marco más general como en el que se ha situado el presente proyecto, se han llevado a cabo diversos estudios de respuesta ante impacto, como el realizado por Andy Bryson y Lloyd Smith (11), o la caracterización del comportamiento mediante metodología extensiométrica (12), publicado por M.A. Rodríguez, P.J.Astola y R. Páez entre otros.

De la misma manera, aparecen numerosos estudios en el uso de la modelización de diferentes espumas basados en softwares fundamentados en el método de elementos finitos. Alguno de los trabajos con una finalidad similar al que se desea conseguir en este proyecto son los realizados por N.J. Mills, C. Fitzgerald, A. Gilchrist y R. Verdejo (13), o el elaborado por R.A. Canseco, K.A. Camarillo, A. Silva y R. Lesso (14), donde se estudia el comportamiento de distintos compuestos foam y se logra simular con gran exactitud este tipo de materiales, logrando así el uso viable en el futuro para diversos ensayos no reproducibles en el laboratorio.

2.2.1 NORMA ASTM D3574 – UNE-EN ISO 8307:2008

La función principal de una norma es buscar la estandarización de productos, certificando la seguridad de todo el proceso, y facilitar el comercio internacional de los distintos bienes y productos con normas comunes.

Las normas ASTM en América, EN en Europa, o UNE en España, son un conjunto de normas tecnológicas de no obligatorio cumplimiento salvo que la administración así lo precise mediante leyes, decretos o reglamentos. A su vez en Europa, toda norma está sujeta a la organización internacional de normalización, o más conocida por sus siglas ISO. Esta organización es la encargada de promover el desarrollo de normas internacionales, ya sean de fabricación, comercio o comunicación en todo el marco industrial.

En este caso, las pautas de ensayo técnico del material Poron XRD siguen la norma ASTM D3574 (*“Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials—Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams”* (15)), que tiene su trasposición en España sobre la norma UNE-EN ISO 8307:2008 (*“Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la resiliencia por bola rebotante.”* (16)), que recoge de manera menos genérica el proceso de normalización del producto.

Por este motivo, en este estudio ha considerado en la norma ASTM. Esta norma se apoya en una serie de pautas que describen cada tipo de prueba que ha de realizarse para la correcta regulación del producto. En el caso de este proyecto fin de grado, para realizar la prueba de compresión uniaxial se han tenido en cuenta los estándares recogidos en el método de ensayo D: *“Constant deflection compression set test”* [Figura 8]. En este apartado, la norma establece una serie de parámetros y requerimientos sobre las características necesarias de las muestras. Algunos de estos parámetros son los siguientes:

- La muestra de ensayo deberá tener superficies superior e inferior, y lados paralelos y perpendiculares.
- Las probetas deberán tener longitudes mínimas de 50 mm de largo (L) y ancho (W), y un espesor (t) mínimo de 25 mm. Sí la muestra no posee un espesor de 25 mm, se emplearán distintas capas, una encima de otra sin el uso de pegamento, de tal manera que se alcance el espesor mínimo.

- Las muestras de espuma tubulares deberán tener una superficie exterior mínima de 100 cm², y su espesor no deberá ser mayor del 75% que la dimensión mínima exterior.
- Los especímenes de productos moldeados con 25 mm o menos de espesor, serán de 50x50 mm cada uno, y deberán tener piel en la superficie superior e inferior.
- Las muestras mayores de 50 mm de espesor deberán ser cortadas desde el centro, hasta alcanzar un grosor de 25 mm.
- Se comprimirá el espécimen hasta el 50% de su espesor, y tras retirar la carga se observarán los resultados después de 60±3 s.
- La placa que servirá de base del soporte de la máquina debe tener unas dimensiones mínimas de 500x500x10 mm³, y estar perforada con agujeros de aproximadamente 6,5 mm de diámetro, distanciados 20 mm en una área mínima de 350x350 mm².
- Se colocará la probeta centrada en la línea de la carga (P) axial sobre la placa de soporte del aparato.

Aparte de las condiciones aquí mostradas, aparecen una serie de requerimientos para el procedimiento de ensayo y el método de cálculo que no se estiman oportunas en este trabajo. Esto es debido a que la finalidad del mismo no es lograr los distintos parámetros de compresión u obtener la validez para su regulación, sino la de ser capaces de entender su comportamiento a través de las distintas gráficas y propiedades que se puedan adquirir en los ensayos.

A su vez, en el desarrollo del procedimiento experimental, las pautas antes detalladas sobre las características de las muestras no regirán nuestro estudio al 100%, aunque si se tomarán en conveniente consideración.

2.3 MODELIZACIÓN DEL MATERIAL

Para la correcta realización de los ensayos y su posterior estudio, previamente se deberá considerar el tipo de modelo material que mejor represente y se aproxime a los materiales Poron. Los poliuretanos, al igual que la mayoría de materiales poliméricos, muestran un comportamiento viscoelástico. Pero por otro lado, tras verificar los especímenes, en la piel del Poron se apreciaron pequeñas deformaciones permanentes debidas a la indentación del proyectil o percutor. Por lo tanto, se manejan dos posibles comportamientos que puedan explicar analíticamente el comportamiento de las muestras, que se trate de un material viscoelástico o de un material hiperelástico.

- Material viscoelástico: Este tipo de materiales presentan propiedades intermedias entre viscosas y elásticas. Esto significa que, frente a una carga instantánea, se deformará instantáneamente y aparecerá una deformación diferida y creciente con el tiempo. De esta manera la tensión dependerá de la deformación y de la velocidad de deformación, y para un instante de tiempo concreto no existe relación entre ellas, ya que influye la historia de estados tensionales y deformacionales por los que ha pasado el material ((17) y (18)).

El modelo viscoelástico que se ha supuesto para las muestras Poron es un modelo formado por tres parámetros: un muelle en serie con el modelo Kelvin-Voigt. Este modelo consta de dos muelles con conducta basada en la ley de Hooke y un amortiguador, dispuestos como muestra la Figura 9.

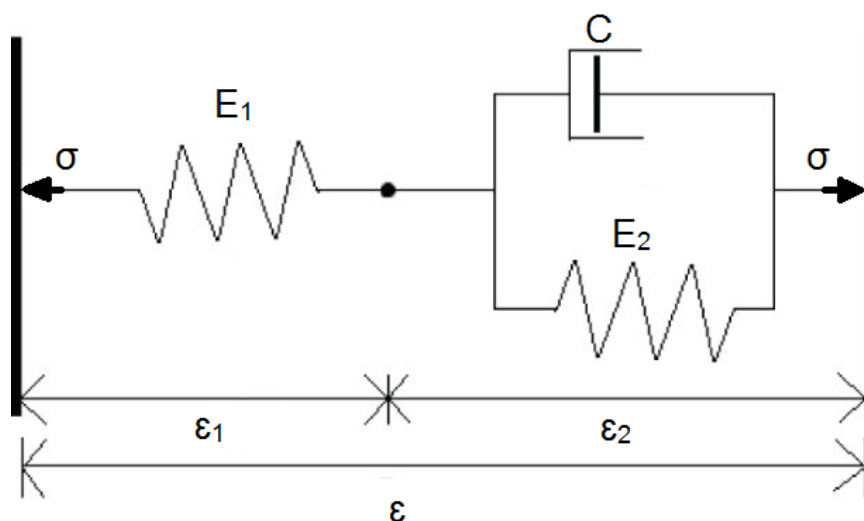


Figura 9. Planteamiento del modelo viscoelástico.

La razón por la cual se ha pensado en este modelo y no simplemente un modelo genérico de Maxwell o Kelvin-Voigt, es porque el modelo Kelvin-Voigt describe un comportamiento reversible ante la deformación, pero no una respuesta instantánea del material, y viceversa. De esta manera se logra una mejor representación de la realidad, ya que el material estudiado presenta una respuesta instantánea frente al trabajo externo, y un comportamiento reversible tras la acción este. Las ecuaciones del sistema son las siguientes:

$$\sigma + \frac{c}{E_1 + E_2} \cdot \dot{\sigma} = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \cdot \varepsilon + \frac{E_1 \cdot c}{E_1 + E_2} \cdot \dot{\varepsilon} \quad (2.1)$$

$$p = \frac{c}{E_1 + E_2} \quad q_0 = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \quad q_1 = \frac{E_1 \cdot c}{E_1 + E_2} \quad (2.2)$$

Dónde: c es la viscosidad del amortiguador.

E_1 y E_2 son los módulos Young de los muelles 1 y 2.

σ es la tensión que soporta el material.

$\dot{\sigma}$ es la velocidad con la que se aplica la tensión.

ε es la deformación que adquiere el material.

$\dot{\varepsilon}$ es la velocidad de deformación que sufre el material.

De manera que, la función de fluencia y el módulo de relajación quedan:

Función de fluencia: $J(t) = \frac{p}{q_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{1}{q_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (2.3)$

Siendo: el esfuerzo cortante $\rightarrow \tau = \frac{q_1}{q_0} = \frac{c}{E_2} \quad (2.4)$

t el tiempo de relajación del material.

Módulo de relajación: $Y(t) = \frac{q_1}{p} \cdot e^{-\frac{t}{p}} + q_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{p}}\right) \quad (2.5)$

- **Material hiperelástico:** Los materiales hiperelásticos o materiales elásticos de Green, son un tipo de material elástico para el cual la ecuación constitutiva que relaciona tensiones y deformaciones puede obtenerse a partir de la energía elástica de deformación, es decir, estos materiales son un caso particular de material elástico de Cauchy (19)).

Existe una gran variedad de modelos hiperelásticos, por esta razón se ha elegido un modelo sencillo capaz de explicar la conducta de las muestras: el modelo de Mooney-Rivlin (20).

El modelo Mooney-Rivlin presenta una hiperelasticidad isótropa, es decir, la función de densidad de energía de deformación (W) depende solamente de los invariantes (I_1, I_2, I_3) o de los alargamientos principales ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$), facilitando el cálculo de la tensión y por consiguiente del resto de parámetros del modelo. El modelo Mooney-Rivlin de segundo orden, consta de 5 constantes, y presenta la siguiente forma:

$$W = C_{10} \cdot (I_1 - 3) + C_{01} \cdot (I_2 - 3) + C_{11} \cdot (I_1 - 3) \cdot (I_2 - 3) + \\ + C_{20} \cdot (I_1 - 3)^2 + C_{30} \cdot (I_1 - 3) \quad (2.6)$$

Siendo: C_{ij} los coeficientes de Rivlin

Este método proporciona buenos resultados para un intervalo de deformación comprendido entre [10%-60%] (20). Debido a que las deformaciones son pequeñas, se suele aproximar la curva tensión-deformación con sus valores elásticos E y G (módulo de Young y módulo cortante respectivamente). Para el modelo de primer orden con dos coeficientes de Rivlin esto queda:

$$E = (C_{10} + C_{01}) \cong 3 \cdot G \quad (2.7)$$

Dónde: G es el módulo de cortadura

2.3.1 OTROS ANÁLISIS FENOMENOLÓGICOS

Además del planteamiento del material idóneo, también se deberá hacer una comparación de la resiliencia y la tenacidad que se produce en las muestras (21):

- El efecto de la resiliencia se describe como la energía de deformación que es capaz de recuperar un cuerpo deformado cuando el esfuerzo que causa la deformación cesa. De este modo, podemos decir que la resiliencia es igual al trabajo externo realizado para deformar un material hasta su límite elástico. Dicho de manera más simple, la resiliencia es la energía capaz de almacenar en el periodo elástico, y se observa en la curva tensión-deformación en el área bajo la curva correspondiente hasta llegar al límite elástico (*Figura 10*).
- Por otro lado, la tenacidad corresponde a la energía total que es capaz de absorber la muestra hasta el límite de rotura. De igual manera que la resiliencia, es equivalente al trabajo externo realizado, pero en este caso hasta la rotura del material.

En los experimentos que se realizarán en el presente proyecto no se alcanzará dicho límite, con lo cual se efectuarán comparaciones de tenacidad entre los dos tipos de muestras hasta el cese del esfuerzo aplicado (*Figura 10*).

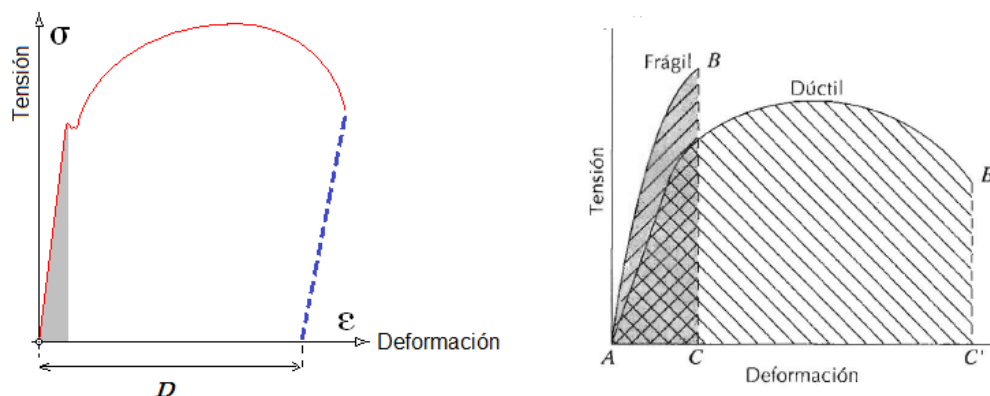


Figura 10. Representación del área bajo la curva de resiliencia (Izq.), y de la tenacidad (Der.).



CAPÍTULO 3

MÉTODO EXPERIMENTAL Y MATERIALES

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los materiales y métodos empleados para la correcta realización de este trabajo fin de grado.

En el ámbito experimental, se han realizado dos tipos de ensayos para caracterizar el material a impacto: ensayos de caída libre a diferentes alturas utilizando bolas de acero y ensayos de impacto a baja velocidad en una torre de caída de peso.

Todos los ensayos han sido grabados con una cámara de alta velocidad para comparar los datos adquiridos del software con los valores del tracking [4.4].

Estos ensayos se han llevado a cabo en el parque tecnológico y en los laboratorios del departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras de la Universidad Carlos III de Madrid.

3.2 MATERIALES

3.2.1 PORON

Como se ha explicado en el capítulo anterior, existen multitud de combinaciones posibles a la hora de conformar un poliuretano. Dependiendo del tipo de monómero constituyente y de las condiciones a las que se lleve a cabo la reacción, el poliuretano puede llegar a poseer diferentes propiedades.



Figura 11. Zonas de protección (8).

Este proyecto se ha realizado sobre materiales Poron, que cuenta con distintos tipos espumas: de amortiguamiento, de absorción de impacto, de rebote, de protección antimicrobiana, de protección extrema contra impactos, etc (Figura 13). A su vez, los distintos materiales están catalogados por el tipo de impacto que puede asimilar en función de su espesor, densidad y peso.

Los materiales sometidos a ensayo son de protección extrema contra impactos, o Poron tipo XRD. Para este estudio se han elegido dos tipos de compuestos diferentes que suelen cubrir zonas de mayor protección: el Poron 20236-65, con buen rendimiento frente a impactos medios, y el Poron XED-09625-65 para impactos fuertes (Figura 11).

Con fin de comparar el comportamiento de las dos muestras, se les confirió un tamaño aproximado de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ (Figura 12).

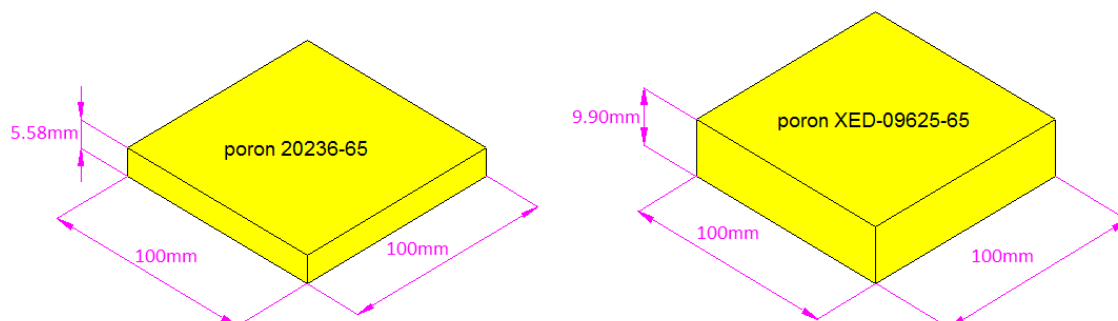


Figura 12. Dimensiones de las placas Poron.

Las propiedades de ambas placas se presentan a continuación (Tabla 2 y Tabla 3):

Nombre de la propiedad	Valor
Espesor [m]	$5.58 \cdot 10^{-3}$
Volumen [m ³]	$5.54 \cdot 10^{-5}$
Masa [Kg]	0.019
Densidad [Kg/m ³]	342.89

Tabla 2. Propiedades de las probetas Poron 20236-65.

Nombre de la propiedad	Valor
Espesor [m]	$9.90 \cdot 10^{-3}$
Volumen [m ³]	$1.01 \cdot 10^{-4}$
Masa [Kg]	0.030
Densidad [Kg/m ³]	297.03

Tabla 3. Propiedades de las probetas Poron XED-09625-65.



Figura 13. Diferentes tipos de conformados Poron.

Aunque existan diferencias de masa y espesor, la densidad de ambos especímenes es muy similar para las dimensiones que se les otorgó a las muestras, un aspecto importante como se verá más adelante en el análisis de los resultados [4.5].

3.3 DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

3.3.1 TORRE DE CAÍDA DE PESO

Para estudiar el comportamiento de las muestras frente a impactos de baja velocidad se han realizado ensayos en una torre de caída de peso instrumentada.

En este ensayo, a un elemento percutor se le confiere una determinada velocidad (asociada a una energía) con la que se desea impacte contra la muestra, de manera que sólo se efectúe un golpe. El percutor posee unas bandas extensiométricas que obtienen el registro de la fuerza ejercida en cada instante de tiempo.

El instrumento utilizado en los ensayos es una torre de caída de peso *Ceast-Fractovis* modelo 6785 (Figura 14). El equipo de adquisición de datos (*DAS 4000*) adosado a la torre posee el software necesario (*CEAST Fracture Mechanics*) para manejar toda la información, y puede registrar hasta un máximo de 4000 datos con un tiempo de muestreo mínimo de 1 μ s. Este sistema mide la fuerza y el tiempo de contacto, y mediante la integración de estos parámetros obtiene las demás variables, como la velocidad, la ener-

gía, y el desplazamiento en función del tiempo. A partir de este registro se puede determinar, entre otros parámetros, la energía absorbida por la probeta.

$$F = m \cdot a \rightarrow a = \frac{F}{m} \rightarrow v = \int a \cdot \delta t \rightarrow d = \int v \cdot \delta t \quad (3.1)$$



Figura 14. Torre de caída 6785 Ceast Fractovis (22).

La torre de caída *Ceast-Fractovis* está formada por dos partes:

- La parte superior, designada cámara del impactador, consta de un cabezal móvil denominado impactador (o conjunto percutor) guiado por columnas para que el desplazamiento sea completamente vertical. Este conjunto percutor puede ser lanzado desde una altura máxima de caída libre de 1 m. También dispone de un sistema de muelles para simular caídas de hasta 20 m.

En este habitáculo se encuentran localizados unos dispositivos encargados de absorber energía residual tras haber realizado el impacto, llamados bloques de parada, y un equipo antirrebote controlado por un sistema neumático activado por un fotodetector, que detiene el percutor tras el primer impacto sobre la probeta.

• La parte inferior corresponde a la base, la cual proporciona estabilidad a la torre y es donde se coloca el utillaje en el que se sitúan las probetas a ensayo. Además esta zona es una cámara climática que permite el enfriamiento mediante nitrógeno líquido por su vaporización al entrar en contacto con la atmosfera, alcanzando una temperatura de hasta $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$. A su vez, con el uso de unas resistencias que calientan la cámara, se llegan a alcanzar los $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un termopar situado en esta cámara permite controlar dicha temperatura. Según el fabricante, las especificaciones técnicas de este equipo son las siguientes (*Tabla 5*) (22):

Especificaciones	Mín.	Máx.
Velocidad de impacto [m/s]	0.5	20
Masa de impacto [Kg]	3.62	50
Altura de caída [m]	0	1
Máx. Deflexión del muelle [mm]	----	149
Cte. de Rigidez del muelle [N/m]	49391.5	
Máx. Energía proporcionada [J]	----	1315.86
Accesorios	Cámara Climática Integrada ($-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$)	

Tabla 4. Especificaciones técnicas de la torre de caída Ceast-Fractovis 6785.

Además de las partes mencionadas anteriormente, pertenecen también a la torre de caída dos módulos externos:

- El panel de control, que permite operar sobre el control de la torre.
- El Sistema de adquisición de datos, que se encarga de recoger y almacenar los datos generados en el ensayo de impacto.

Se puede observar todo el conjunto de la torre en la Figura 15.

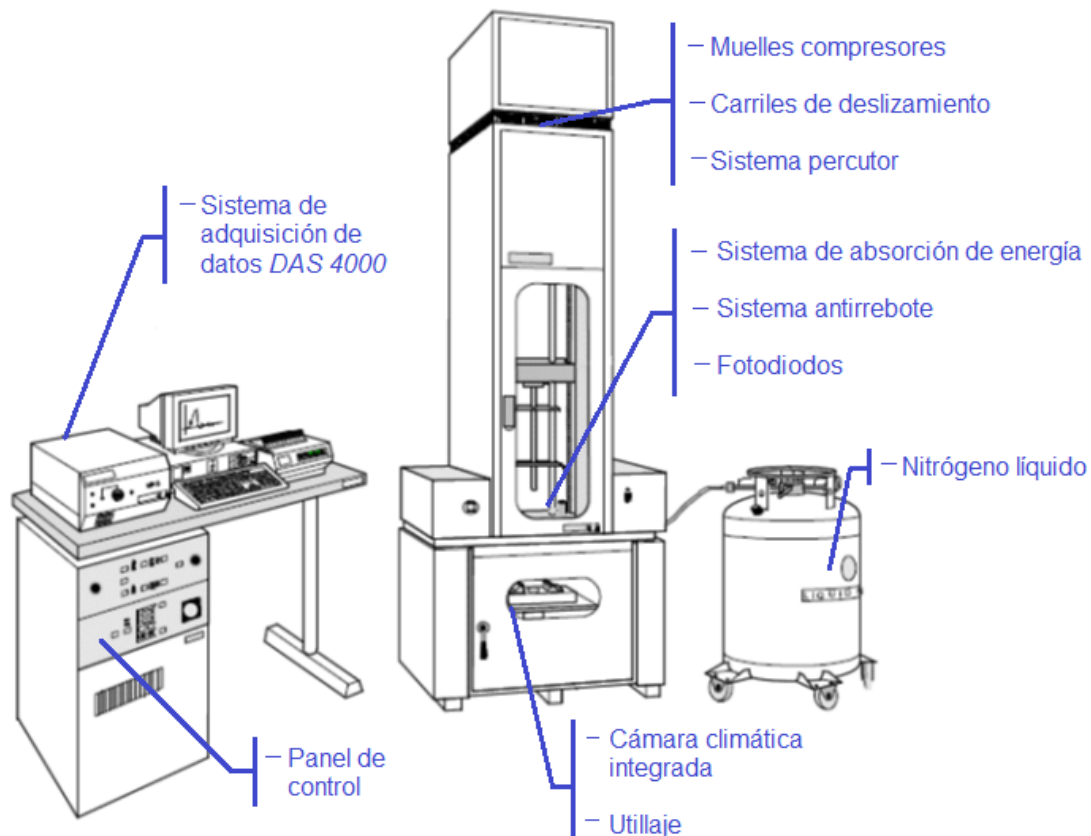


Figura 15. Partes principales de la torre de caída de peso Ceast Fractovis 6785 (22).

Para los ensayos de impacto a baja velocidad es necesario seleccionar adecuadamente el utilaje con el fin de obtener los resultados deseados. En este ensayo elegiremos dos dispositivos, el percutor y el sistema de amarre:

- El percutor es el encargado de aplicar la carga sobre el espécimen, y consta de la instrumentación necesaria para registrar los valores de la carga en cada instante de tiempo. La cabeza del percutor es la zona que incide directamente sobre la probeta, por ello la elección del percutor se realiza teniendo en cuenta tanto la forma y dimensiones de esta (Figura 16). La masa del conjunto cabeza y cuerpo del percutor, se suma a la del mecanismo de sujeción y guiado, obteniendo una masa total de impacto de 4,130 Kg.

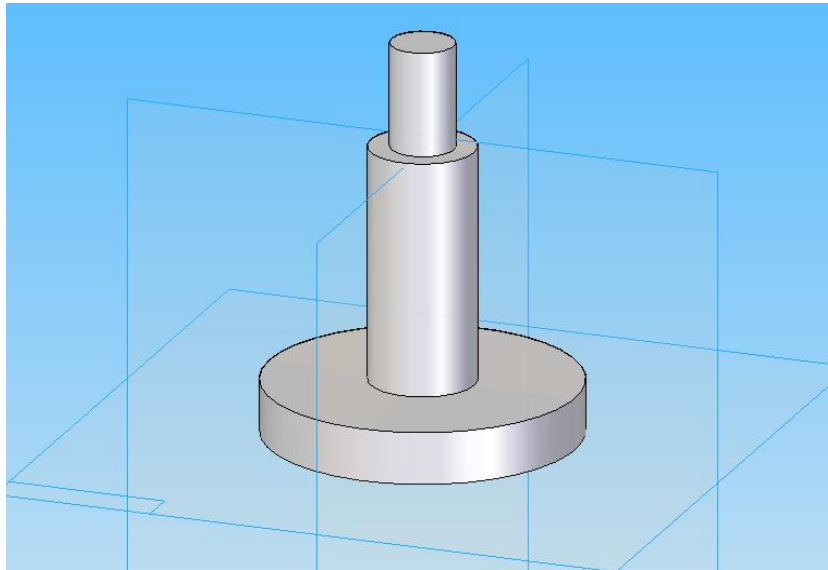


Figura 16. Representación 3D del percutor utilizado en los ensayos de torre de caída de peso.

- El equipo también cuenta con un sistema de amarre de la probeta, para establecer unas condiciones de confinamiento determinadas a las muestras. En este caso no usaremos ninguna restricción de movimiento en las placas sometidas a estudio para poder observar su comportamiento y capacidad de rebote. Las muestras se han situado sobre el soporte de utillaje, con una colocación centrada como muestra la Figura 17.

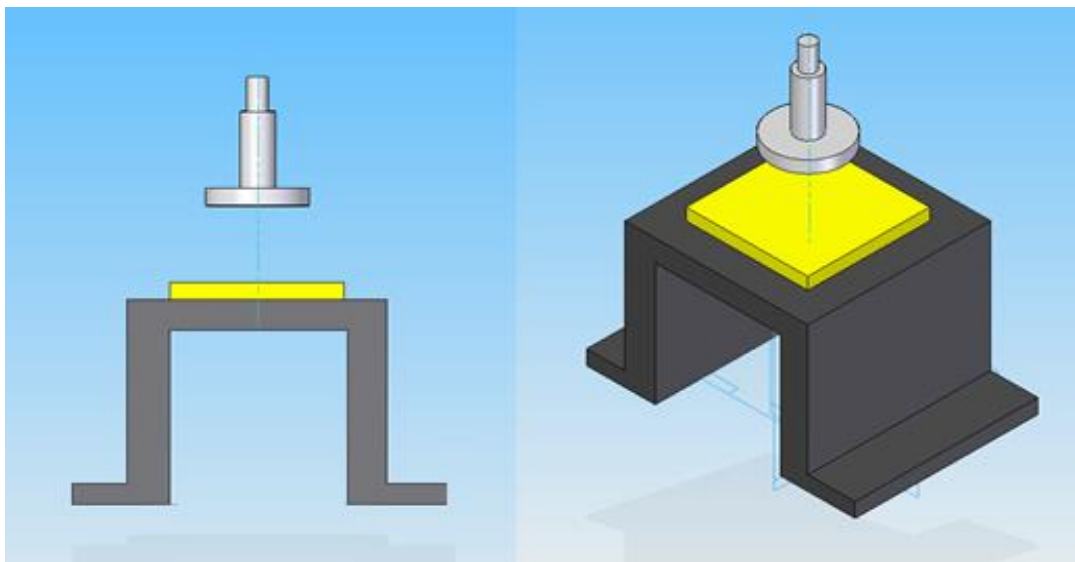


Figura 17. Representación esquemática 3D de la colocación de las muestras en la placa soporte.

La instrumentación necesaria para recoger la información de la prueba se encuentra alojada en la cabeza del percutor. Dicha instrumentación está formada por un sensor empotrado en su interior, que transmite la deformación elástica en forma de señal eléctri-

ca durante el impacto. Esta señal es recogida, amplificada y procesada por el sistema de adquisición de datos (*DAS 4000*).

Los sensores que recogen la señal del ensayo son de tipo resistivo. Estos dispositivos están compuestos por cuatro galgas extensiométricas colocadas en puente de wheatstone, de manera que al ser sometidas a presión varían sensiblemente su longitud y en consecuencia su resistencia eléctrica. Como resultado de estas perturbaciones en el puente de wheatstone se origina la señal de salida del sensor (*Figura 18*).

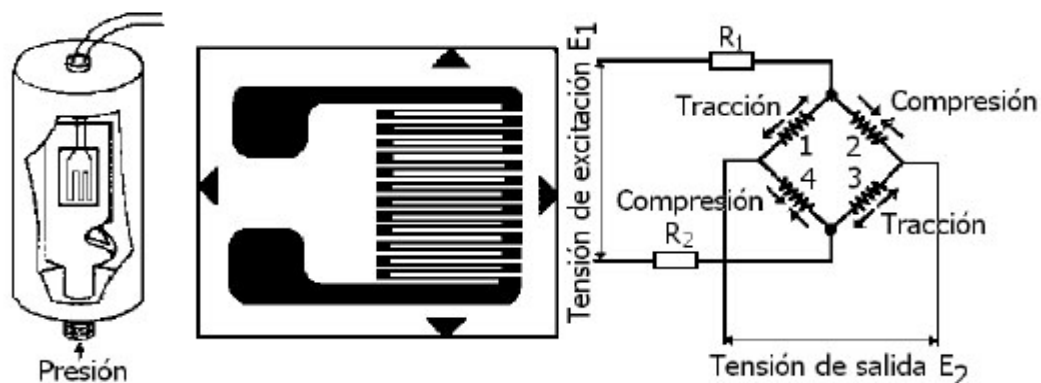


Figura 18. Funcionamiento del circuito eléctrico con puente de wheatstone (23).

Gracias a este sistema montado en la cabeza del percutor se obtiene la gráfica de Fuerza-Tiempo, y por integración de esta las curvas de Velocidad-Tiempo, Desplazamiento-Tiempo y Energía-Tiempo.

3.3.2 CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD Y SISTEMA DE ILUMINACIÓN

Todos los ensayos se han grabado utilizando una cámara digital de alta velocidad. Con las imágenes captadas es posible determinar y analizar el proceso de impacto. La cámara digital de alta velocidad empleada es una Photron Ultima APX-RS (*Figura 19*) que dispone de un equipo de adquisición de datos MCDL (Multi Channel Data Link).



Figura 19. Cámara de alta velocidad Photron Ultima APX-RS.

En los ensayos, la cámara se ha configurado con 1000 fps (imágenes por segundo) con una resolución de imagen de 1024X1024 pixels (24). La cámara ha sido colocada de manera que fue capaz de captar parte de la caída, el impacto y los sucesivos rebotes sobre las muestras. Esta cámara tiene una memoria interna determinada, de manera que tras el momento de inicio de la grabación la cámara almacena 1 segundo previo a este instante. Con una visualización posterior se elige el inicio y duración de la grabación que más tarde se someterá a análisis.

Para la correcta captura de los ensayos con estas cámaras de alta velocidad, se requiere una iluminación constante de alta intensidad. Se ha empleado un foco Arrisun 12 Plus con una lámpara HMI (Hydrargyrum Medium Arc-length Iodide) de 1200 W que proporciona luz no pulsada; su encendido se ha realizado justo antes del ensayo para evitar que el calentamiento de las muestras o de las bandas extensométricas del percutor influyan en los resultados (Figura 20) (25).



Figura 20. Sistema de iluminación Arrisun 12 plus HMI.

3.4 TIPOS DE ENSAYOS

3.4.1 MÉTODO DE CÁLCULO EN ENSAYOS A BAJA VELOCIDAD

Uno de los ensayos de baja velocidad más utilizados es el de impacto en torre de caída. Con este tipo de ensayo se estudia el comportamiento del material ante cargas dinámicas. Este procedimiento consiste en dejar caer un percutor desde una altura determinada. El percutor impacta contra la muestra, y dependiendo de la energía que tenga en ese momento, efectuará un golpe mayor o menor al material ensayado. Para simular alturas mayores a la altura máxima de la torre (1 metro), se aumenta la energía del percutor. Para ello, a esta energía de impacto se le puede otorgar una velocidad inicial de 20 m/s y una masa de hasta 50 Kg, llegando a los 1315.86 julios.

Para calcular la energía con la que el percutor golpea la probeta se hace uso del principio de conservación de la energía mecánica. Esta simplificación en los cálculos es posible gracias a que se desprecian los rozamientos internos entre el percutor y los carriles de deslizamiento.

$$E_T = E_c + E_p + E_e = Cte \quad (3.2)$$

Siendo: E_T la energía mecánica total del sistema
 E_c la energía cinética
 E_p la energía potencial gravitatoria
 E_e la energía potencial elástica

De esta manera, la energía con la que incide el impactador contra la placa en el instante $t=0$ del impacto queda:

$$E_T = E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_i^2 \quad (3.3)$$

Dónde: m es la masa del conjunto percutor
 v_i es la velocidad de impacto

Conocida la masa, se despeja la altura de la ecuación anterior:

$$h = \frac{v_i^2}{2 \cdot g} \quad (3.4)$$

De la misma manera se tiene que:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (3.5)$$

Dónde: g es la aceleración de la gravedad

h es la altura inicial de caída del percutor

Como se puede observar de las fórmulas anteriores, se puede modificar la energía variando la velocidad de impacto. Para esto se aumenta o disminuye la altura de caída del percutor. La velocidad de impacto se corresponde con la ecuación:

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.6)$$

Por último, la energía potencial elástica o energía de deformación, hace referencia a la energía interna acumulada en el interior del material Poron, es decir, la energía que es capaz de absorber. Para obtener dicho valor es necesario conocer la energía cinética de impacto ($h=0$) y la energía potencial en el rebote ($v_i=0$).

$$E_e = E_c - E_p \quad (3.7)$$

3.4.2 ENSAYO DE IMPACTOS A BAJA VELOCIDAD SOBRE ESPUMA DE POLIURETANO

En este apartado se explicarán los métodos que se han realizado para la consecución de los objetivos planteados. Para ello, lo primero que se realizó fue un ensayo de caída libre a diferentes alturas sobre las muestras con el fin de observar las capacidades de absorción de estas. Tras comprobar que las placas de Poron tenían una gran capacidad de absorción de impactos, se prosiguió con los ensayos en la torre de caída de peso para conseguir unos datos más minuciosos y poder comparar así los resultados de ambas muestras.

Todos los ensayos se realizaron tres veces, de acuerdo como marca la norma, para después obtener una magnitud media entre las tres pruebas y comprobar la repetitividad del proceso.

3.4.2.1 ENSAYO DE CAÍDA LIBRE

La finalidad de estos ensayos fue la comprobación de las magnitudes de absorción de energía en los materiales Poron. En estas pruebas se utilizaron las placas de Poron originales, de unos 22x30 cm, usando rodamientos de bolas de diferentes diámetros para conseguir una variación en la energía del proyectil. Estos ensayos se realizaron en el parque tecnológico de la universidad.

Rodamientos de bolas: Los proyectiles que se han seleccionado para las pruebas de caída libre a varias alturas han sido rodamientos de bolas de acero de 30, 40 y 100 mm de diámetro (*Figura 21*).



Figura 21. Rodamientos de bolas de distintos diámetros

La elección de este material ha sido principalmente por su densidad, ya que al tratarse de ensayos de caída libre, es decir, sin imponer una velocidad o aceleración distinta a cero en el momento inicial, se requerían objetos de pequeña envergadura capaces de impactar fácilmente y de manera centrada en las placas de Poron, pero a su vez que tuvieran el mayor peso posible para almacenar la mayor energía antes del impacto a baja velocidad.

Otra consideración a tener en cuenta a la hora de escoger este tipo de bolas y su material fue su rigidez, para evitar cualquier deformación plástica que se pueda producir durante el impacto.

Procedimiento: En primer lugar, se buscó un entorno limpio y plano donde colocar las muestras para que la realización de la prueba fuese lo más adecuada posible. Después se colocó la cámara de alta velocidad y el sistema de iluminación de manera óptima para la correcta adquisición de imágenes. Acto seguido, se posicionó una regla como referencia en la zona posterior de la perspectiva que captaba la cámara. Por último, se marcaron las diferentes alturas desde donde se dejarían caer las bolas (50 cm, 100 cm, 150 cm y 200 cm). En la Figura 22 se puede ver un ejemplo del procedimiento.

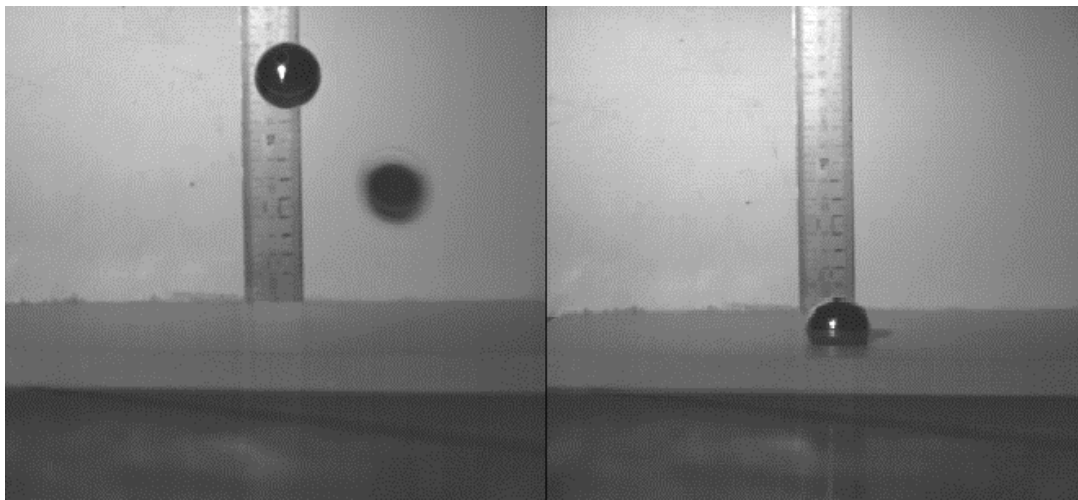


Figura 22. Captura del ensayo de impacto de la bola de 30 mm contra la placa Poron.

Haciendo uso del principio de conservación de la energía mecánica explicado en el apartado anterior [3.4.1], se pudo hallar la energía y la velocidad teóricas con la que impactaban las bolas sobre las muestras (Tabla 5). Se denominan resultados teóricos ya que provienen de cálculos obtenidos del modelo numérico [ecuaciones 3.3 y 3.6]:

Siendo: $m = \rho_{acero} \cdot \vartheta = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{acero}$ (3.8)

$$\rho_{acero} = 7850 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$g = 9,81 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Altura [m]	Velocidad [m/s]
0,5	3,13
1	4,43
1,5	5,43
2	6,26

Tabla 5. Velocidades de impacto teóricas para las distintas alturas.

Altura [m]	Energía [J]			
	Radio:	15 mm	20 mm	50 mm
0,5		0,54	1,29	20,16
1		1,09	2,58	40,32
1,5		1,63	3,87	60,48
2		2,18	5,16	80,64

Tabla 6. Energías de impacto teóricas para los distintos diámetros y alturas.

Como se puede observar, los datos recogidos en la última tabla (Tabla 6), muestran las energías alcanzadas en el impacto de los distintos rodamientos de bolas. Por seguridad, las pruebas que debían realizarse con el rodamiento de 100 mm de diámetro fueron descartadas ya que se consideró que eran demasiado grandes para unas pruebas preliminares y las muestras podían ser dañadas. Solo se realizó un ensayo desde 25 cm ($E_p=10,08$ [J]) para así preservar las muestras de Poron en buenas condiciones para los siguientes ensayos.

Tras la realización de estos ensayos, se realizó el análisis a los videos obtenidos con la cámara de alta velocidad. Se calcularon las alturas de rebote de las bolas, sus velocidades y se hallaron los valores de energía absorbida y así poder compararlos con los valores teóricos.

Para esto se utilizará el coeficiente de restitución C_R , que resulta del cociente de las velocidades relativas después y antes del choque, e indica la cantidad de energía absorbida por las muestras, tendiendo a ser mayor en los impactos baja velocidad.

$$C_R = \frac{V_r}{V_i} \quad (3.9)$$

Dónde: V_i es la velocidad inicial o de impacto
 V_r es la velocidad de rebote

3.4.2.2 ENSAYO EN TORRE DE CAÍDA

Este ensayo experimental se utilizará para determinar las propiedades mecánicas de los materiales Poron dispuestos en este trabajo. Para un correcto procedimiento de la prueba, se consideró la norma *ASTM 3574* apartado *D* para ensayos sobre espumas de poliuretano descrita en el apartado [2.2.1]. Estos ensayos de impacto se realizaron en un entorno controlado: la torre de caída de peso Ceast-Fractovis modelo 6785, situada en el laboratorio del departamento de medios continuos y teoría de estructuras de la UC3M (*Figura 23*). Las pruebas se realizaron a una temperatura ambiente de 25 °C.



Figura 23. Entorno de trabajo de la Torre de caída de peso Ceast-Fractovis 6785 (22).

La norma establece una serie de requerimientos para los ensayos de compresión uniaxial, de los cuales nuestras muestras deben de cumplir 4 de ellas, y que recordamos a continuación:

- La muestra de ensayo deberá tener superficies superior e inferior, y lados paralelos y perpendiculares.
- Se colocará la probeta centrada en la línea de la carga (P) axial sobre la placa de soporte del aparato.
- Las probetas deberán tener longitudes mínimas de 50 mm de largo (L) y ancho (W), y un espesor (t) mínimo de 25 mm. Sí la muestra no posee un espesor de 25 mm, se emplearán distintas capas, una encima de otra sin el uso de pegamento, de tal manera que se alcance el espesor mínimo.

- Se comprimirá el espécimen hasta el 50% de su espesor, y tras retirar la carga se observarán los resultados después de 60 ± 3 s.

Nuestras placas de Poron sólo cumplen dos de los requisitos. Por falta de placas Poron suficientes para llegar al espesor mínimo exigido por la norma, en este caso se realizaron las pruebas sobre cada una de las planchas por separado con el espesor original. Tampoco se llevó a cabo la prueba de compresión mínima del 50% del espesor de las placas.

En principio estas normas rigen el ensayo para dar mayor validez al experimento, pero no debe suponer un problema debido a que nuestro ensayo no es una prueba de compresión axial sino de impacto.

El impactador utilizado en la torre de caída de este ensayo es de base plana. A diferencia de las pruebas realizadas con los rodamientos de bolas de diferentes diámetros, donde en el momento inicial del impacto solo existía un punto de contacto, se tiene que la zona de contacto placa-impactador es una circunferencia de diámetro 59 mm. Este hecho hace que las energías elegidas para la realización de este ensayo fuesen mayores sin riesgo a que las muestras sufriesen estructuralmente. El rango de energías dispuesto fue de 1, 3, 5, 7, 10 y en la placa Poron XED-09625-65 de hasta 15 julios (*Tabla 7*).

Energía de ensayo [J]		1	3	5	7	10	15
Número de ensayos realizados	Poron 20236-65	3	3	3	3	3	---
	Poron XED-09625-65	3	3	3	3	3	3

Tabla 7. Esquema de los ensayos realizados sobre las muestras.

Como se comentó anteriormente en la introducción de este apartado [3.4.2], se realizaron 3 ensayos para cada uno de los materiales y energías, ya que así lo recomienda la norma. Posteriormente se corrigió el desfase entre cada prueba y después se determinó la media para cada uno de los resultados. A continuación se muestra un ejemplo de dicho procedimiento (*Figura 24*).

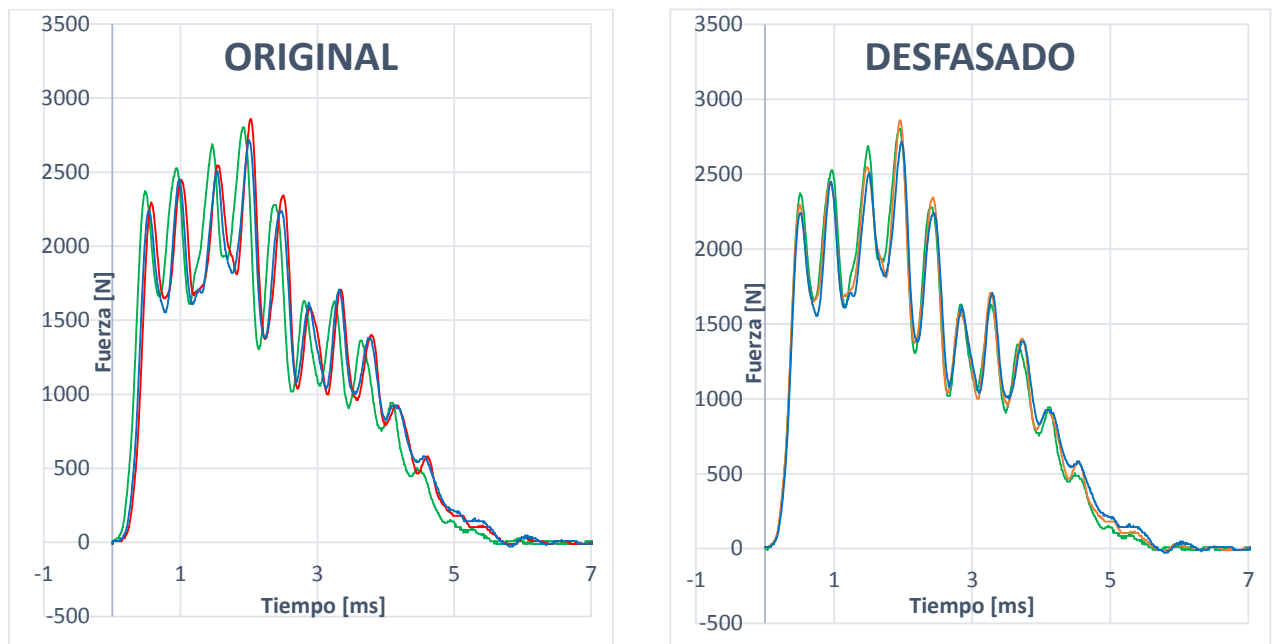


Figura 24. Gráficas Fuerza-Tiempo del ensayo en la torre de caída de peso de 5 [J]. A la izquierda los valores originales del software de la torre, a la derecha las gráficas desfasadas.

Como se puede observar en las gráficas Fuerza-Tiempo anteriores de los datos obtenidos en la prueba de 5 julios, se ha realizado un desfase a los valores volcados por el sistema de adquisición de datos de la torre de caída. Esta necesidad de desfase se debe a una leve desincronización en el instante inicial de captación de los datos que han realizado los sensores del impactador.

Además del ajuste o sincronización mencionado, más adelante con el programa *Photron Fastcam Viewer*, se analizarán cuatro videos de manera aleatoria para verificar que los datos obtenidos a través del sistema de adquisición de datos *DAS 4000* eran correctos. Con el programa *tracker* se analizaron todos los videos para lograr los datos y gráficas de velocidad y desplazamiento, y a partir de ellos poder calcular la energía.

3.5 ANÁLISIS VIDEO TRACKING

El seguimiento de video o video tracking, está basado en el uso de distintos algoritmos que analizan de forma secuencial los fotogramas del video. El proceso de localización del objeto (u objetos) depende de la calidad de la imagen, la edición del video, el algoritmo, el tipo de movimiento que describe el objeto a estudio, y lo más importante de todo, la velocidad de los fotogramas.

Estos modelos matemáticos de masa puntual son determinados por la región del video elegida con el segmentador y por los parámetros del modelo. Existen dos tipos de modelos: analíticos y dinámicos. El modelo analítico define funciones de posición respecto al tiempo, mientras que el modelo dinámico define funciones de fuerza y condiciones de contorno para solucionarlo mediante métodos numéricos de ecuaciones diferenciales (26).

Según el rango de precisión requerido se debe usar un algoritmo u otro, o lo que es lo mismo, el uso de distintos programas. Para el análisis de los vídeos esta diferencia de exactitud ha sido relevante para el cálculo de los resultados. Mientras que para el cálculo de la velocidad se requiere una mayor precisión, en el estudio de las trayectorias y energías sólo se estudiará la tendencia, las deformaciones en el impacto y los sucesivos rebotes con un error asumible entorno al 10%.

El análisis efectuado a los vídeos capturados con la cámara de alta velocidad, se ha realizado con dos programas: el Photron Fastcam Viewer para verificar la velocidad del impactador en cada ensayo, y el Tracker para el seguimiento del impactador en cada frame del vídeo.

En las pruebas descritas a continuación se ha utilizado una velocidad suficientemente alta (1000 fps) para poder visualizar con exactitud los cambios de trayectoria que describe el impactador con los modelos de video de partículas. Tras esto se acotarán el inicio, el final y la duración de los videos para poder compararlos con los datos de la torre de caída en el mismo instante de tiempo. Estos videos permitirán analizar de manera cualitativa los resultados experimentales proporcionados por los ensayos de caída libre y la torre de caída, y compararlos posteriormente con las simulaciones numéricas.

3.5.1 PHOTRON FASTCAM VIEWER

Este software está pensado para el almacenamiento y la visualización de secuencias de imágenes grabadas a alta velocidad. La finalidad del Photron Fastcam Viewer en este caso ha sido la verificación de los datos obtenidos a través del software de la torre de caída, por esta razón no se ha utilizado ningún tipo de algoritmo propio del programa o crear uno nuevo, tan sólo la visualización de imágenes. Para ello, en cada vídeo se ha tomado la longitud del diámetro del impactador como referencia conocida, y con una simple regla de proporción poder medir cuál es el valor real de un pixel (*Figura 25 y Figura 26*).



Figura 25. Captura del programa con selección del diámetro del impactador para el valor de 1mm x pixel.



Figura 26. Captura del programa con selección del diámetro del impactador para el valor de 0,18776mm x pixel.

Después, se calcula el número de píxeles que ha descendido el impactador en un número de frames determinados, y conociendo la velocidad de grabación (1000 fps) se obtiene la velocidad de impacto del ensayo.

Es importante tener en cuenta que el error cometido en los cálculos posteriores dependerá tanto de la correcta realización de la medida como de la diferencia de pixels que se hayan tomado.

3.5.2 TRACKER

El programa utilizado para la obtención de la trayectoria y la energía en el transcurso de cada video ha sido el programa Tracker. Este software de simulación GNU (licencia pública general) desarrollado en java y con estructura física de código abierto (open source physics), es muy rápido y útil para comparar los datos del vídeo con los datos de la torre de caída, ya que en tan sólo se necesitan 5 pasos que explicamos a continuación [4.4]:

- En primer lugar, se debe definir un eje de coordenadas (*Figura 27 [1]*), que se tomará en la superficie inferior de nuestra muestra.

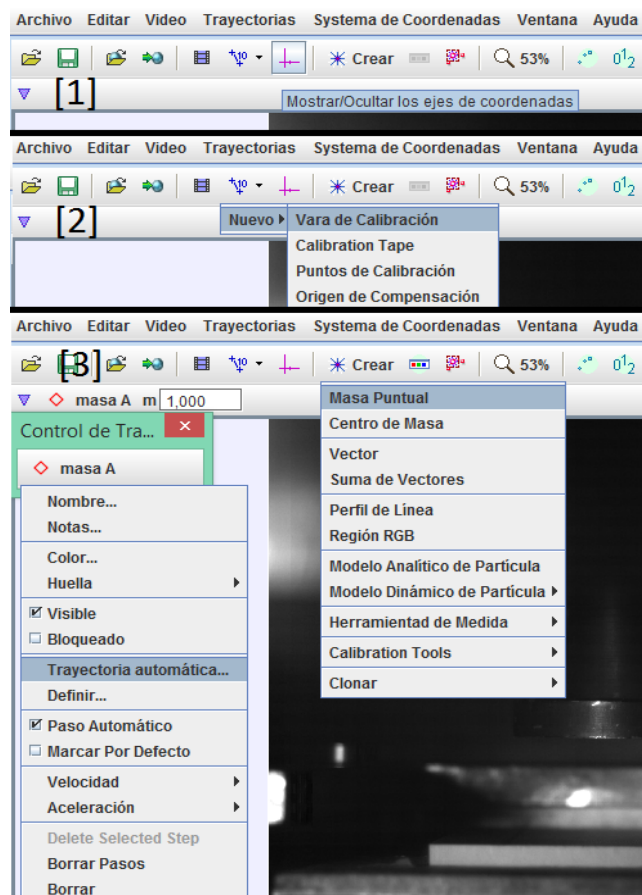


Figura 27. Pasos 1,2 y 3 del proceso de análisis de video mediante el software tracker.

- Después, al igual que en el programa anterior, se tiene que tomar una distancia conocida como distancia de referencia (“vara de calibración”, *Figura 27 [2]*). Del mismo modo que antes, esta distancia será el diámetro del impactador.
- Posteriormente se tiene que elegir la región que se desea rastrear (“masa puntual → trayectoria automática”, *Figura 27 [3]*).

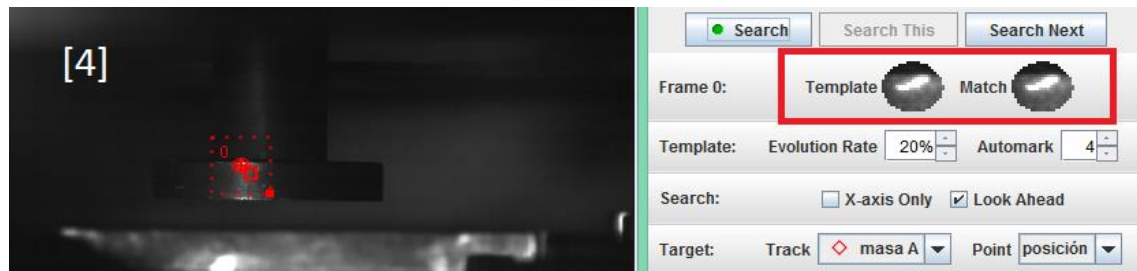


Figura 28. Pasos 4 del proceso de análisis de video mediante el software tracker.

- Como se puede apreciar en la imagen anterior (*Figura 28 [4]*), debido a que el ensayo se realizó en la torre de caída no se pudo incorporar un fondo diferenciable, y por tanto, no se aprecia mucha diferencia entre la luminosidad del fondo y del impactador. Por fortuna éste último presentaba una pequeña protuberancia que facilitó la correcta obtención de los resultados.
- Por último, se pueden elegir las gráficas y datos que muestre el programa, así como cambiar el principio y el fin del muestreo cambiando el inicio y duración del video.



CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en los distintos ensayos experimentales realizados. Este bloque se divide en dos apartados:

En el primero de ellos, se exponen los datos obtenidos a través del análisis de los videos en el ensayo de caída libre de rodamientos con el programa “*Photron Fastcam Viewer*”, y compara estos valores con los teóricos calculados anteriormente [3.4.2.1].

El segundo bloque contiene las curvas de datos adquiridos en los ensayos de la torre de caída de peso. Dentro de este apartado, se realiza una comparativa entre los resultados de ambas muestras y también se efectúa una comparación de estas curvas con las obtenidas a partir del análisis de video con el programa “*Tracker*”.

4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VIDEO DE LOS ENSAYOS CON RODAMIENTOS

Los videos de los ensayos de caída libre sirvieron para evidenciar la capacidad de absorción que poseen las muestras sometidas a estudio. Los análisis mediante el programa *Photron Fastcam Viewer* permitieron obtener datos como v_i , v_r , h_r , c_r , E_{ci} , E_{pr} , E_e (ecuaciones [3.7] y [3.9]), donde h_r es la altura de rebote que alcanzan las bolas. Estos datos se muestran a continuación (Tabla 8 - Tabla 13):

Poron 20236-65				
Altura [m]	V_i [m/s]	h_r [m]	V_r [m/s]	C_R
0,5	3,38	0,035	0,695	0,205
1	4,45	0,053	0,869	0,195
1,5	5,57	0,069	0,993	0,178
2	6,31	0,087	1,221	0,194

Tabla 8. Valores de ensayo de caída libre con bola de 30 mm sobre Poron 20236-65.

Poron 20236-65				
Altura [m]	V_i [m/s]	h_r [m]	V_r [m/s]	C_R
0,5	3,13	0,028	0,611	0,195
1	4,55	0,042	0,851	0,187
1,5	5,39	0,0589	1,047	0,194
2	6,33	0,076	1,169	0,185

Tabla 9. Valores de ensayo de caída libre con bola de 40 mm sobre Poron 20236-65.

Poron 20236-65							
Proyectil de 30 mm				Proyectil de 40 mm			
E_{ci} [J]	E_{pr} [J]	E_e [J]	%Abs	E_{ci} [J]	E_{pr} [J]	E_e [J]	%Abs
0,634	0,038	0,596	93,99	1.287	0,071	1.216	94,46
1,099	0,057	1,042	94,78	2.721	0,110	2.611	95,97
1,720	0,075	1,645	95,65	3.822	0,152	3.670	96,03
2,206	0,094	2,112	95,73	5.270	0,196	5.074	96,28

Tabla 10. Valores de la energía cinética en el impacto (E_{ci}), energía potencial en el rebote (E_{pr}), energía elástica de la placa (E_e) y porcentaje de absorción total del material Poron 20236-65.

Poron XED-09625-65				
Altura [m]	V_i [m/s]	h_r [m]	V_r [m/s]	C_R
0,5	3,21	0,020	0,528	0,165
1	4,56	0,035	0,721	0,158
1,5	5,38	0,049	0,935	0,174
2	6,44	0,067	1,090	0,169

Tabla 11. Valores de ensayo de caída libre con bola de 30 mm sobre Poron XED-09625-65.

Poron XED-09625-65				
Altura [m]	V_i [m/s]	h_r [m]	V_r [m/s]	C_R
0,5	3,22	0,019	0,528	0,164
1	4,44	0,031	0,730	0,164
1,5	5,42	0,045	0,882	0,163
2	6,29	0,057	1,04	0,165

Tabla 12. Valores de ensayo de caída libre con bola de 40 mm sobre Poron XED-09625-65.

Poron XED-09625-65							
Proyector de 30 mm				Proyector de 40 mm			
E_{ci} [J]	E_{pr} [J]	E_e [J]	%Abs	E_{ci} [J]	E_{pr} [J]	E_e [J]	%Abs
0.572	0,022	0.550	96,13	1,363	0,049	1,314	96,37
1.152	0,039	1.114	96,65	2,593	0,081	2,512	96,89
1.606	0,054	1.552	96,65	3,861	0,117	3,744	96,98
2.298	0,073	2.225	96,84	5,205	0,148	5,056	97,15

Tabla 13. Valores de la energía cinética en el impacto (E_{ci}), energía potencial en el rebote (E_{pr}), energía elástica de la placa (E_e) y porcentaje de absorción total del material Poron XED-09625-65.

A continuación, se muestran las curvas de comparación entre los valores teóricos ([resultados teóricos]) y los experimentales de velocidad de impacto, energía de impacto y energía absorbida de cada material en función de la altura de caída (Figura 29 - Figura 34). Siendo la placa denominada como 1 el material Poron 20236-65, y la placa designada como 2 el material Poron XED-09625-65.

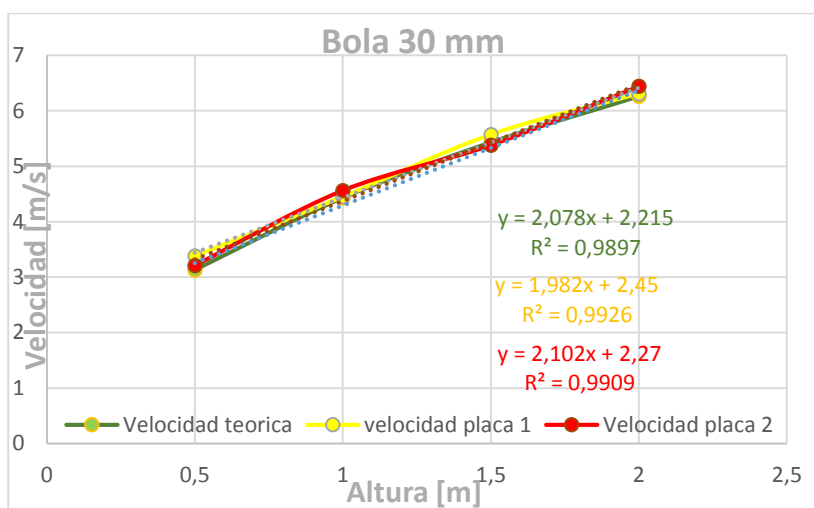


Figura 29. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de velocidad.

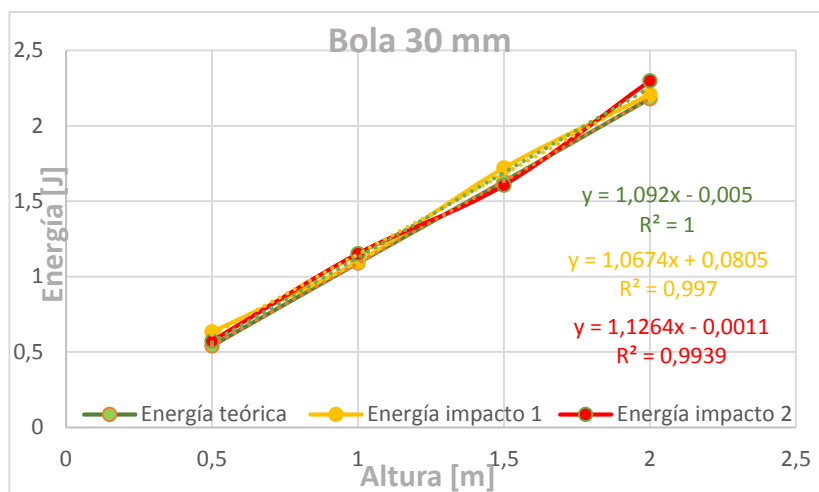


Figura 30. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de energía de impacto.

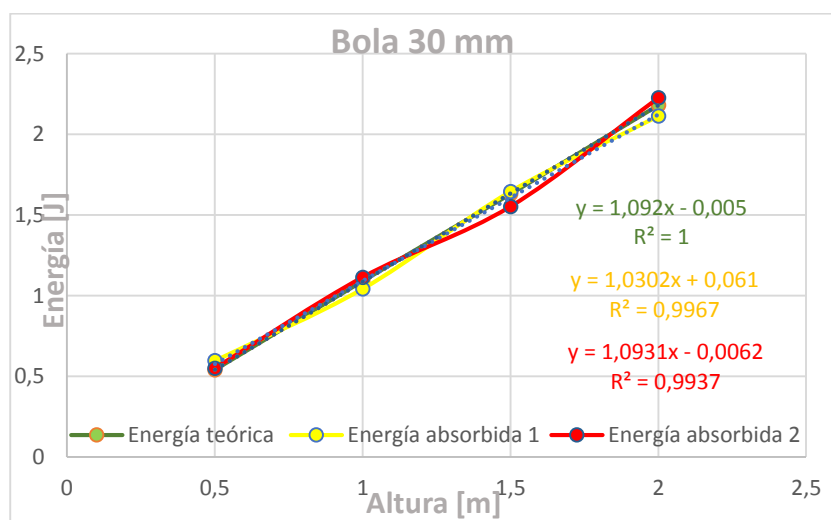


Figura 31. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de energía absorbida.

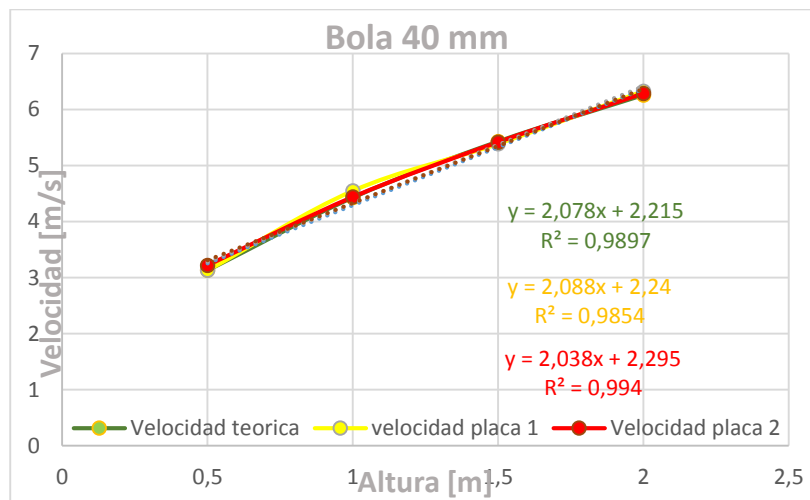


Figura 32. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de velocidad.

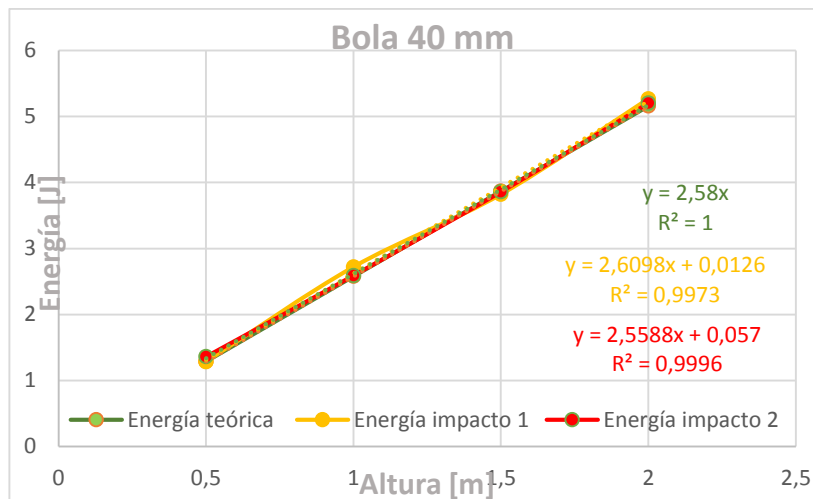


Figura 33. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de energía de impacto.

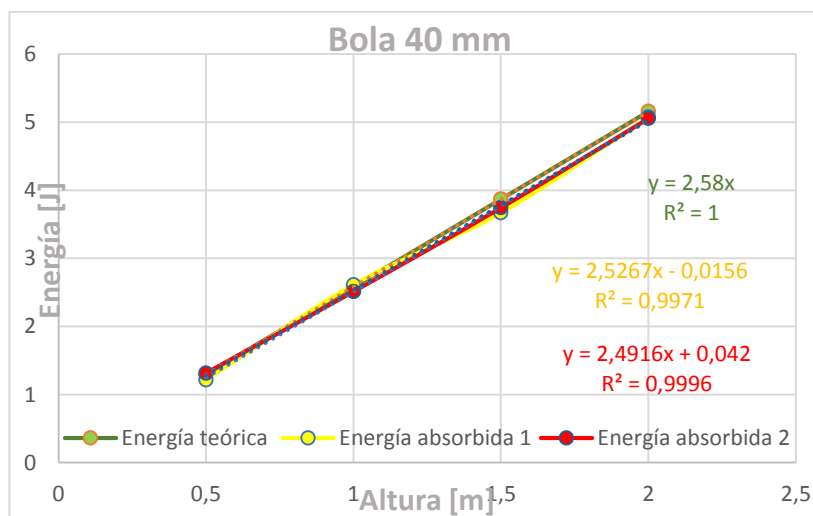


Figura 34. Gráfica comparativa de valores teóricos y experimentales de energía absorbida.

Como se puede observar en las gráficas anteriores (*Figura 29 - Figura 34*), ambos especímenes muestran una relación lineal con un coeficiente de determinación mayor de 0.98, por lo que podemos establecer que los resultados obtenidos mediante el análisis de video se consideran aceptables para futuras predicciones. Todas las correlaciones son directas, por lo tanto la energía absorbida aumenta al aumentar la energía de impacto, alcanzando unos porcentajes de absorción que llegan al 95.4% para el Poron 20236-65, y un 96.7% para el material Poron XED-09625-65 de media entre ambas pruebas de impacto (con la bola de $\varnothing=30\text{mm}$ y bola de $\varnothing=40\text{mm}$).

Aún se deben analizar más detalladamente los resultados anteriores. Para ello se realiza una serie de curvas comparativas donde poder visualizar el comportamiento de las muestras en función de los distintos rodamientos utilizados en los ensayos.

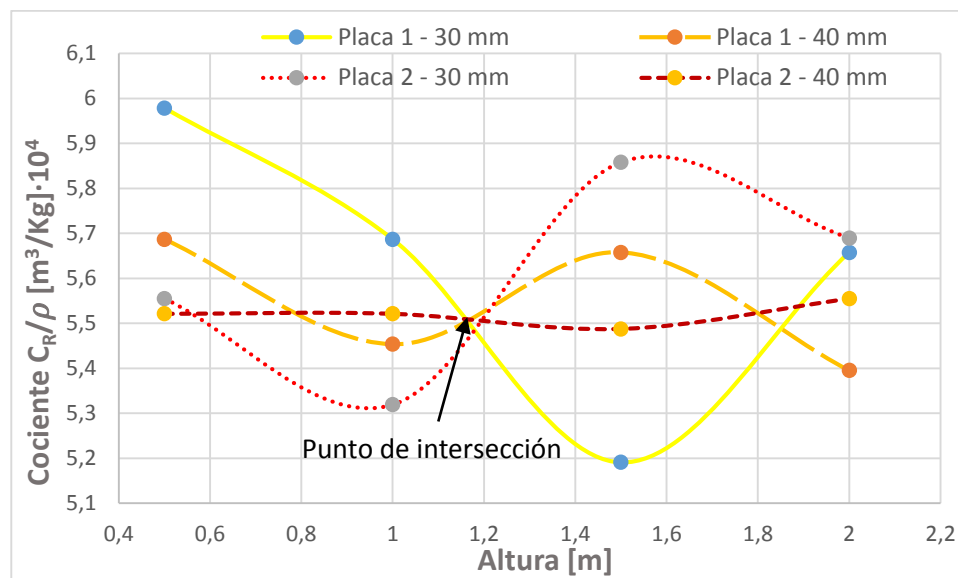


Figura 35. Curvas de comportamiento de los rodamientos en el rebote, en función de la altura inicial de caída.

En la gráfica anterior (*Figura 35*), se muestran los coeficientes C_R , explicados anteriormente [3.9], entre las densidades de cada placa, en función de la altura inicial de caída. En ella se puede ver cómo influye la densidad de las muestras en la velocidad de rebote que llegan a adquirir las bolas.

En los ensayos efectuados con los rodamientos de 30 mm, el Poron XED-09625-65 (placa 2) presenta una progresión del cociente C_R / ρ a medida que aumenta la altura del ensayo, mientras que el Poron 20236-65 (placa 1) muestra un comportamiento inicial de rebote superior, y este va disminuyendo conforme aumenta la altura. Ambos materiales se llegan a estabilizar a 2 metros de altura.

En los ensayos realizados con los rodamientos de 40 mm, el Poron 20236-65 presentan un comportamiento similar al observado en el ensayo de 30 mm del Poron XED-09625-65. Por otro lado, el Poron XED-09625-65 llega a tener una conducta cuasi-lineal en cualquiera que sea la altura de ensayo.

En resumen, los valores del cociente C_R / ρ son más o menos constantes y se encuentran en torno al 5.5-5.6, de manera que se puede observar como el coeficiente de restitución C_R está relacionado con la densidad. En estas curvas también se puede distinguir un punto de inflexión en todas las líneas de dispersión donde se intersectan, relativo a un ensayo desde 1,2 m de altura.

En las gráficas siguientes, se puede observar el porcentaje de absorción de energía de cada material en función de las energías de impacto de los distintos diámetros de bolas utilizados.

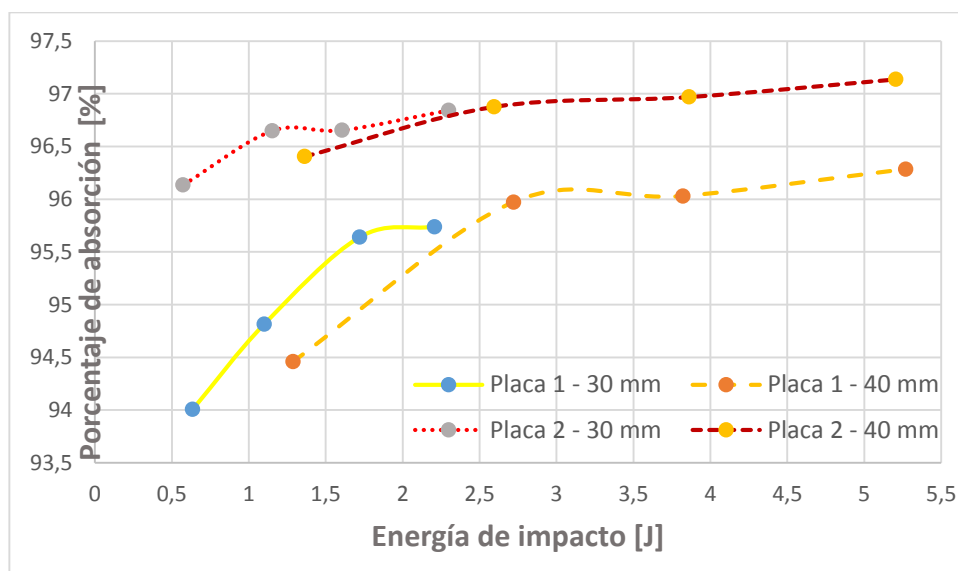


Figura 36. Comparativa del porcentaje de absorción de las muestras según el diámetro de los rodamientos en función de las energías de impacto.

En la Figura 36, se aprecia como el Poron XED-09625-65 (placa 2) posee mayor porcentaje de absorción de impacto que el Poron 20236-65 para las mismas energías ensayadas. También se visualiza como aumenta la energía absorbida conforme se aumenta la energía de impacto en ambos materiales, siendo esta progresión más evidente en el Poron 20236-65.

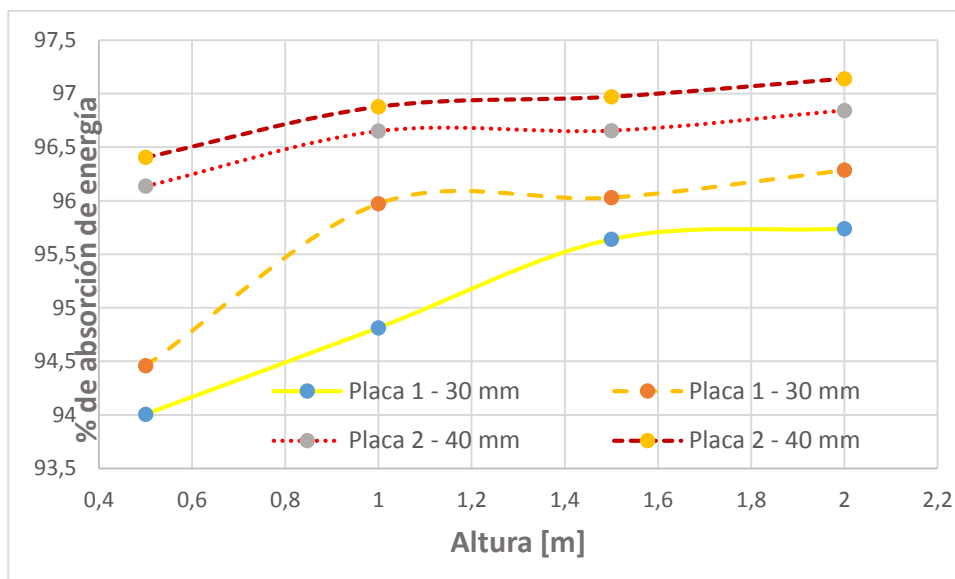


Figura 37. Curvas del porcentaje de absorción de las muestras según el diámetro de los rodamientos para cada nivel de altura ensayada.

En la Figura 37, se distingue con mayor facilidad la tendencia de absorción de las muestras en función de los diámetros usados. En los ensayos efectuados con el rodamiento de 30 mm, las curvas descritas por ambas muestras son más intermitentes frente al aumento de energía de impacto. Por otro lado, en los ensayos hechos con las bolas de 40 mm, las curvas presentan una mayor linealidad y suavidad en la serie.

Las diferencias observadas en estas gráficas (Figura 35, Figura 36 y Figura 37) son debidas al distinto área contacto que presentan los rodamientos de bolas. Pese a que el área de contacto estándar de una esfera con una superficie plana sea un punto, en el impacto contra materiales deformables tipo espuma como los estudiados el área es superior al punto de intersección con el plano tangente, de manera que este área aumenta proporcionalmente con la energía de impacto. De este modo, para los rodamientos macizos con mayor diámetro y por tanto mayor masa, efectuarán un impacto con valores de energía superiores, y el área de contacto con las muestras será mayor.

Por otro lado, tal y como se mencionó anteriormente al final del apartado 3.4.2.2 [Photron] referente al ensayo en la torre de caída de peso, se analizaron cuatro videos de manera aleatoria con el programa *Photron Fastcam Viewer* para comprobar que los datos extraídos por los sensores del impactador hasta el sistema de adquisición de datos *DAS 4000* eran correctos. Por esta razón, no se ha efectuado un análisis como el expuesto previamente del ensayo de caída libre de rodamientos de bolas.

4.3 RESULTADOS DE LA TORRE DE CAÍDA

En la presente sección se mostrarán las gráficas y datos obtenidos del software de adquisición de datos de la torre Ceast-Fractovis. En este apartado se han separado los resultados de las muestras por categorías, y se explica el proceso de filtrado que ha sido llevado a cabo para eliminar las oscilaciones registradas por los sensores, posiblemente originadas por el impacto con el propio soporte del sistema de agarre donde fueron colocadas las muestras de Poron para el ensayo.

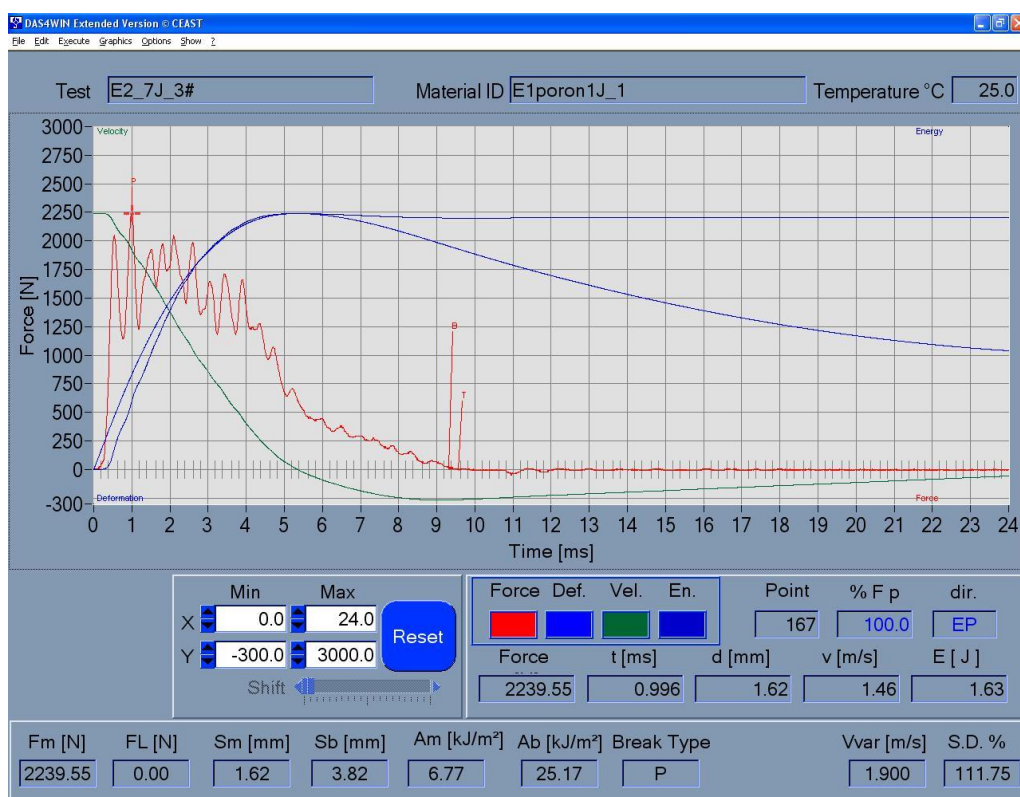


Figura 38. Imagen del software de adquisición de datos DAS 4000 de la torre de caída de peso.

En la imagen anterior (Figura 38), aparecen los datos analizados por el programa interno de la torre de caída DAS 4000. En ella se aprecian los resultados obtenidos en la tercera prueba del ensayo de 7 julios realizada sobre la muestra Poron 20236-65.

Como se comentó anteriormente, la torre primeramente mide la fuerza, y por medio de integración obtiene los demás parámetros [3.1].

4.3.1 FUERZA VS. TIEMPO

En este apartado se exponen las gráficas de evolución de la fuerza ejercida sobre las probetas obtenidas en los ensayos. En estas curvas, se puede observar unas oscilaciones. Estas oscilaciones aparecen en todas las curvas de fuerza y pueden ser originadas por varias causas posibles: vibraciones del sistema percutor por no estar formado por una única pieza, respuesta elástica y vibraciones de las muestras o al posible impacto entre el sistema percutor y el sistema rígido de sujeción de las placas [Figura 17]. Como es lógico, en estas gráficas se observa una tendencia: a medida que se aumenta la energía de impacto aumenta la fuerza incidente. Se produce el aumento de la fuerza y una disminución del tiempo de impacto, que se ve reflejado en el aumento de la pendiente Fuerza-Tiempo (Figura 39 y Figura 40).

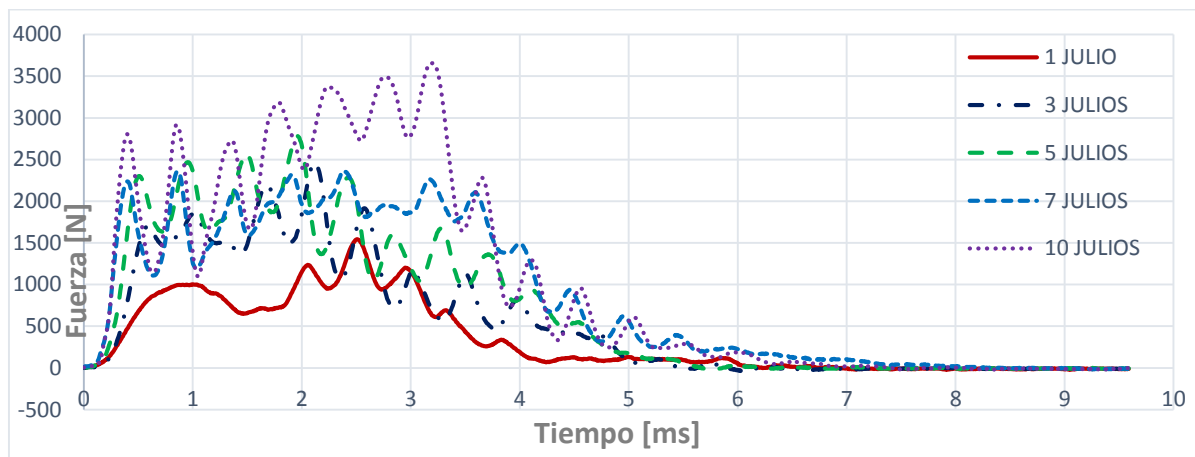


Figura 39. Gráfica de los registros experimentales de la fuerza ejercida sobre la placa Poron 20236-65.

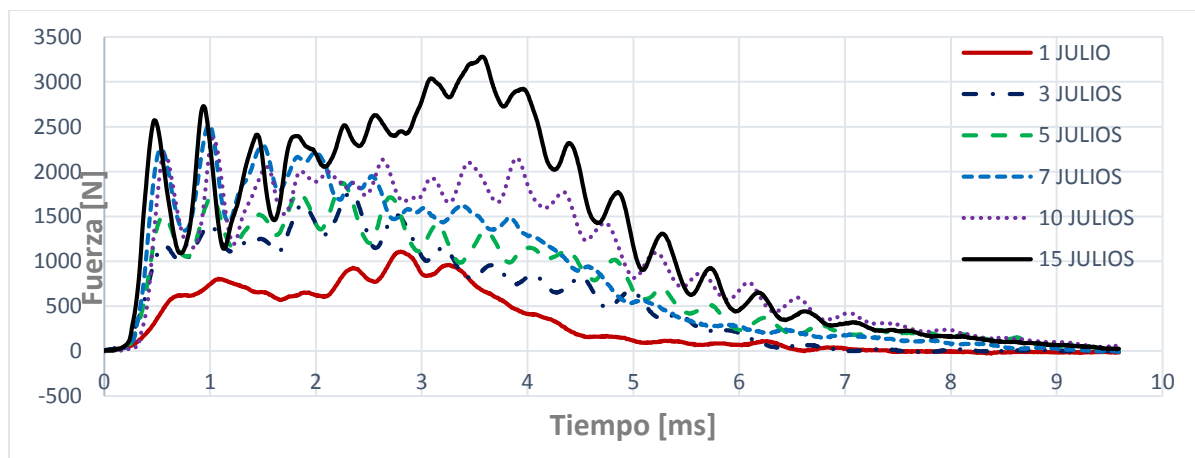


Figura 40. Gráfica de los registros experimentales de la fuerza ejercida sobre la placa Poron XED-09625-65.

Con los datos de las gráficas anteriores, y conociendo el área de contacto del percutor ($A_p=2.734 \cdot 10^{-3} \text{mm}^2$), se calculan los valores de tensión para su representación gráfica. Se asume que esta tensión es constante en todo el área de contacto (*Figura 41 y Figura 42*).

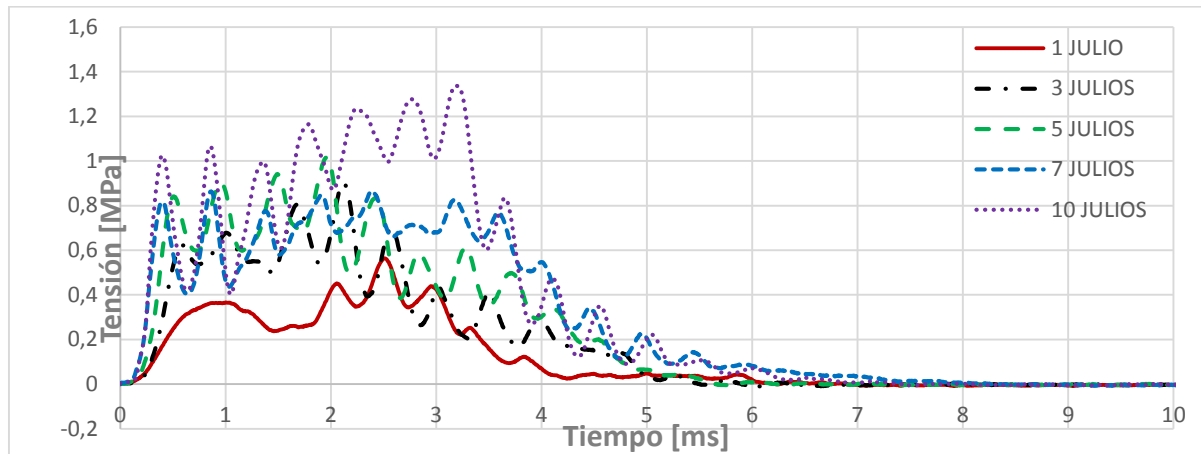


Figura 41. Gráfica de valores de la tensión ejercida experimentalmente sobre la placa Poron 20236-65.

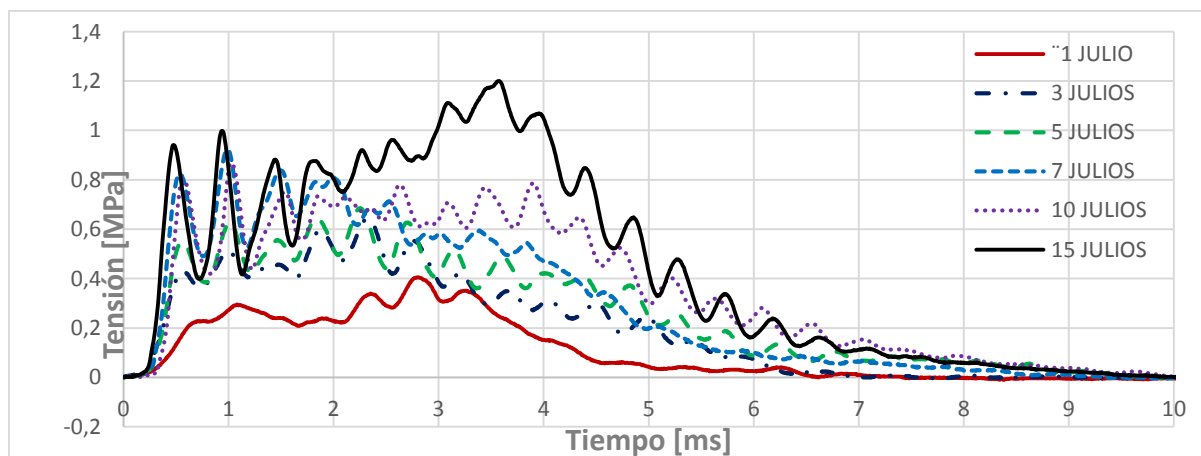


Figura 42. Gráfica de valores de la tensión ejercida experimentalmente sobre la placa Poron XED-09625-65.

Para eliminar las oscilaciones de estas gráficas, se ha sometido a los valores del volcado del sistema de adquisición de la torre a un filtro por serie de Fourier de orden 10. El filtro empleado se ha desarrollado en Excel mediante el complemento “solver”. Este método iterativo se basa en los siguientes pasos:

Primero se calcula la velocidad angular para nuestro período característico de tiempo total de ensayo ($2\pi/T$). Después se crea una columna con los valores de las constantes que se desea que halle el complemento. En este caso como queremos un filtro de orden diez, devolverá 21 constantes (columna amarilla). Se introduce en una columna la ecuación de la serie Fourier que se quiere implementar, y en otra columna la diferencia al cuadrado de esta última con los valores iniciales (columna D). Posteriormente, se crea una celda con la función suma de los valores de la columna anterior (D). Por último, se inicia la herramienta solver para el valor mínimo y sin restricciones (*Figura 43*).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Tiempo	Inicial	Serie F-10	(B-C)^2	Suma columna D			
2	0	1,764815	0	3,114571				
3	0,006	0	0	0		$2\pi/T$		
4	0,012	6,353333	0	40,36484				
5	0,018	6,353333	0	40,36484	Frecuencia	a0		
6	0,024	6,353333	0	40,36484	2	a1		
7	0,03	6,353333	0	40,36484	4	a2		
8	0,036	6,353333	0	40,36484	6	a3		
9	0,042	6,353333	0	40,36484	8	a4		
10	0,048	6,353333	0	40,36484	10	a5		
11	0,054	6,353333	0	40,36484	12	a6		
12	0,06	9,53	0	90,8209	14	a7		
13	0,066	6,353333	0	40,36484	16	a8		
14	0,072	9,53	0	90,8209	18	a9		
15	0,078	9,53	0	90,8209	20	a10		
16	0,084	9,53	0	90,8209		01		
17	0,09	9,53	0	90,8209		02		
18	0,096	9,53	0	90,8209		03		
19	0,102	9,53	0	90,8209		04		
20	0,108	9,53	0	90,8209		05		
21	0,114	9,53	0	90,8209		06		
22	0,12	9,53	0	90,8209		07		
23	0,126	8,118148	0	65,90433		08		
24	0,132	8,118148	0	65,90433		09		
25	0,138	8,118148	0	65,90433		010		
26	0,144	6,706296	0	44,97441				

Figura 43. Tabla Excel efectuada para el proceso de filtrado mediante una serie de Fourier de orden 10.

La ecuación de la serie Fourier de orden 10 utilizada es la siguiente:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t_1 + \theta_1\right) + a_2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t_1 + \theta_2\right) + a_3 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t_1 + \theta_3\right) + \\ + a_4 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t_1 + \theta_4\right) + a_5 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t_1 + \theta_5\right) + \dots \quad (4.1)$$

Estos son los resultados tras este proceso de filtrado (*Figura 44 – Figura 47*):

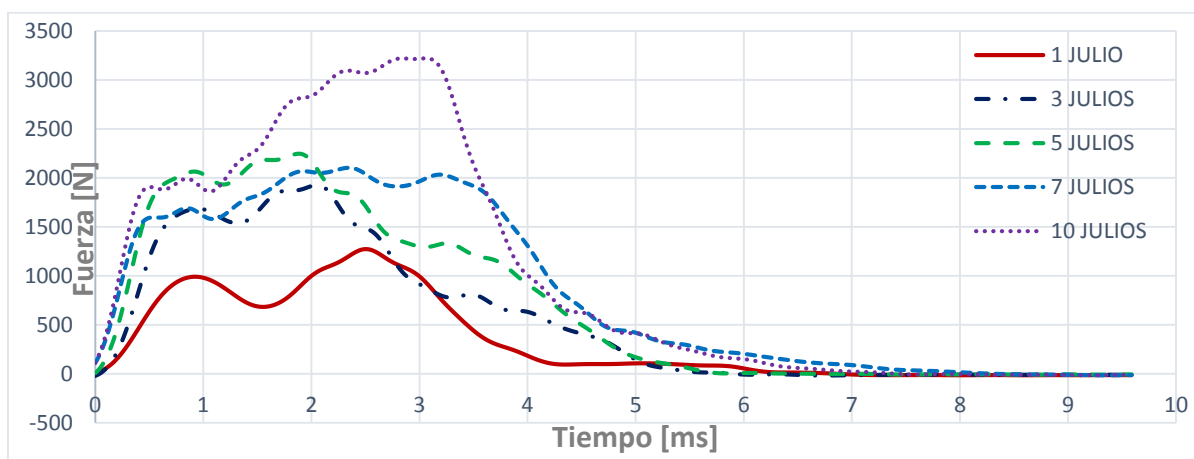


Figura 44. Gráfica de los registros experimentales de la fuerza ejercida filtrados sobre la placa Poron 20236-65.

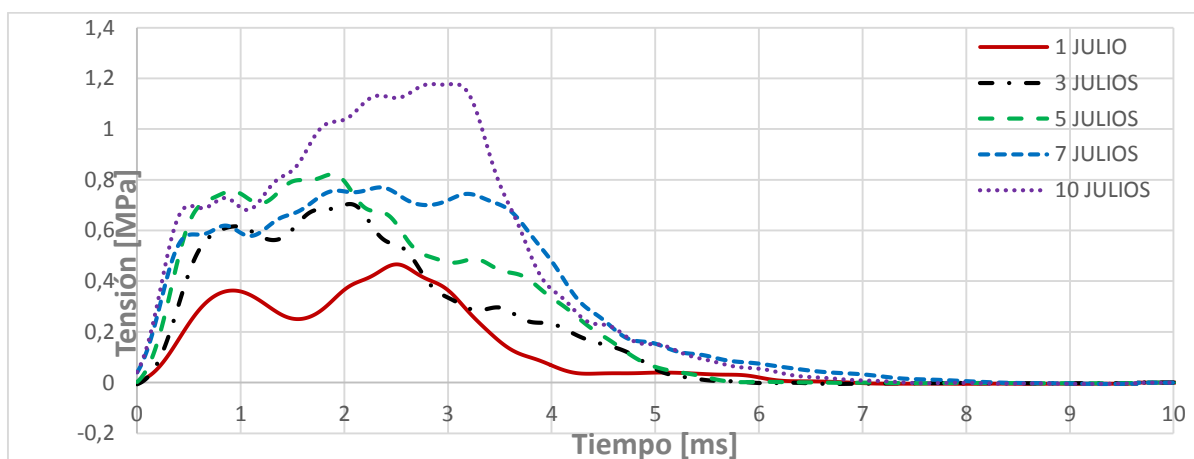


Figura 45. Gráfica de los valores filtrados de la tensión ejercida sobre la placa Poron 20236-65.

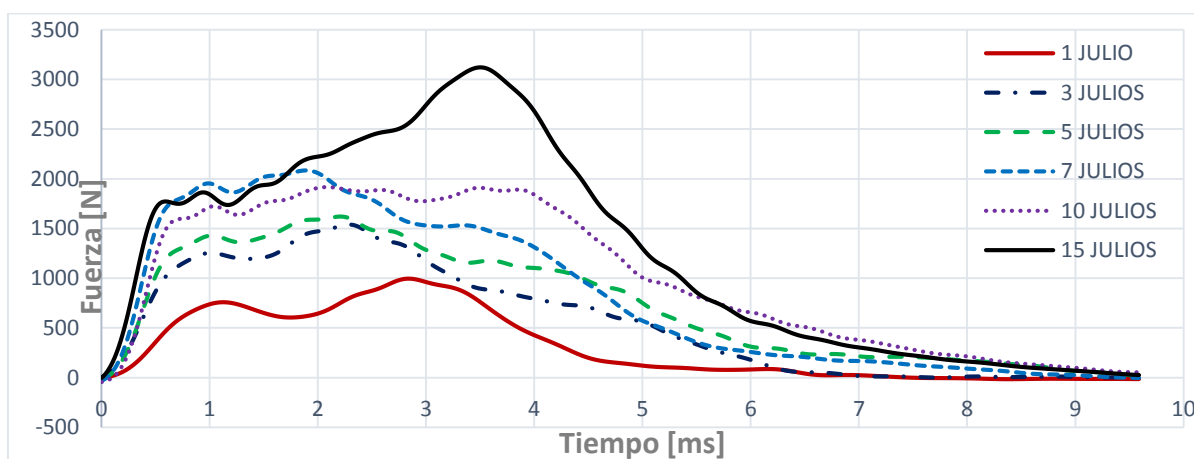


Figura 46. Gráfica de los registros experimentales de la fuerza ejercida filtrados sobre la placa Poron XED-09625-65.

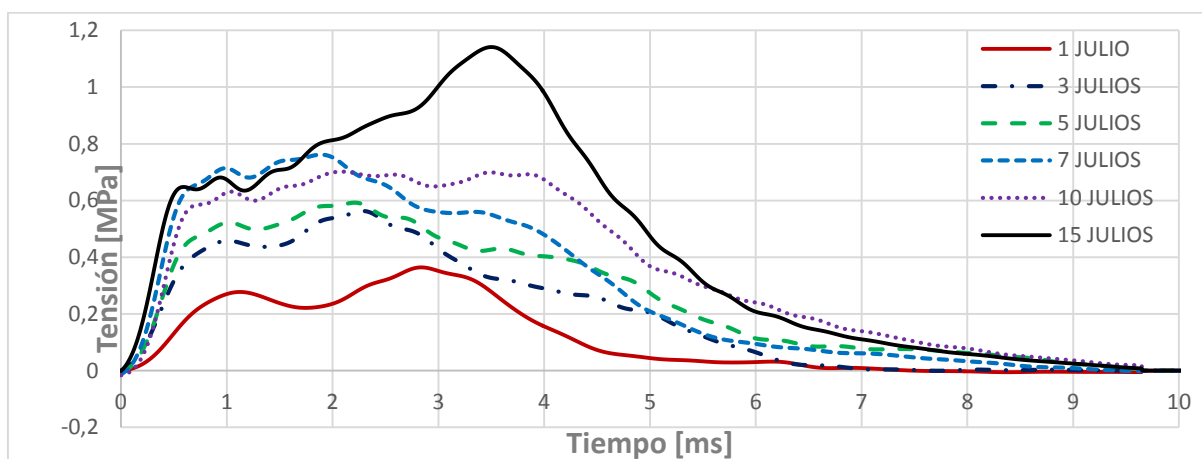


Figura 47. Gráfica de los valores filtrados de la tensión ejercida sobre la placa Poron XED-09625-65.

Cabe destacar los ensayos de 5 julios en la muestra Poron 20236-65 y el 7 julios en la placa XED-0965-65, donde se puede apreciar un aumento importante en la tensión incidente, llegando a ser mayor que en ensayos de energías superiores.

Otro aspecto importante es la fuerza incidente sobre las muestras. Comparando los mismos niveles energía de ensayo, el Poron XED-09625-65 obtiene valores menores de fuerza de indentación que el Poron 20236-65, salvo para las energías de 5 y 7 julios comentadas en el párrafo anterior. De este modo, el trabajo externo de deformación absorbido, es decir, la tenacidad, del Poron 20235-65 es mayor que la del Poron XED-09625-65.

Una vez filtradas las perturbaciones originadas por las vibraciones del ensayo, se pasa a calcular las curvas Tensión-Deformación de cada energía para definir el comportamiento de los materiales Poron de los que se dispone (Figura 48 y Figura 49).

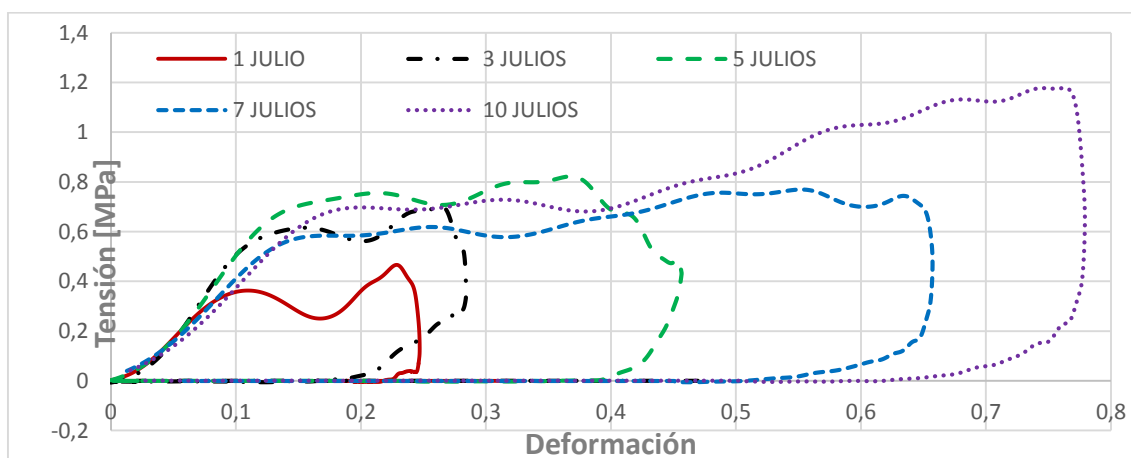


Figura 48. Curva Tensión-Deformación de la placa Poron 20236-65.

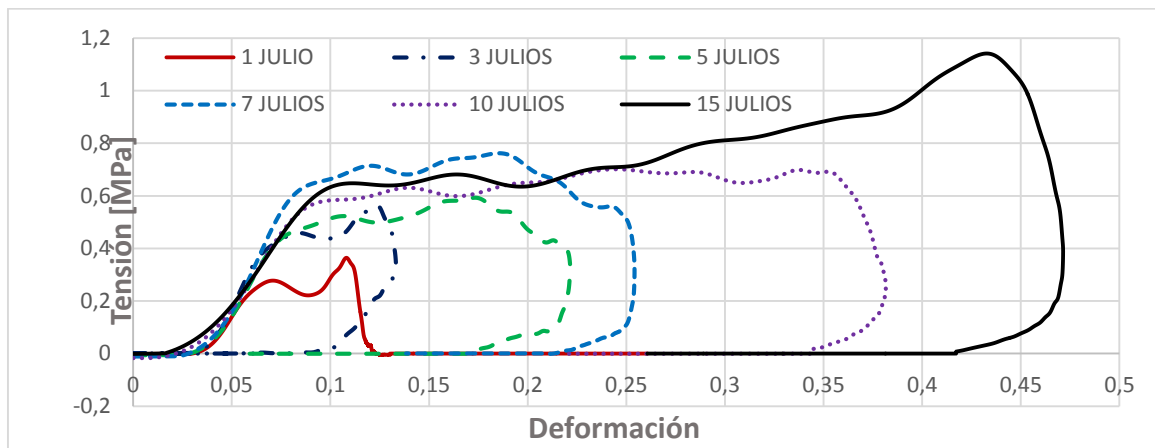


Figura 49. Curva Tensión-Deformación de la placa Poron XED-09625-65.

Finalmente, se han cogido los valores de cada curva de energía hasta su límite elástico y se han ajustado para obtener la pendiente característica de cada material, o lo que es lo mismo, su módulo de elasticidad E . Para ello, en las gráficas posteriores se ha realizado un análisis de regresión lineal (Figura 50 y Figura 51).

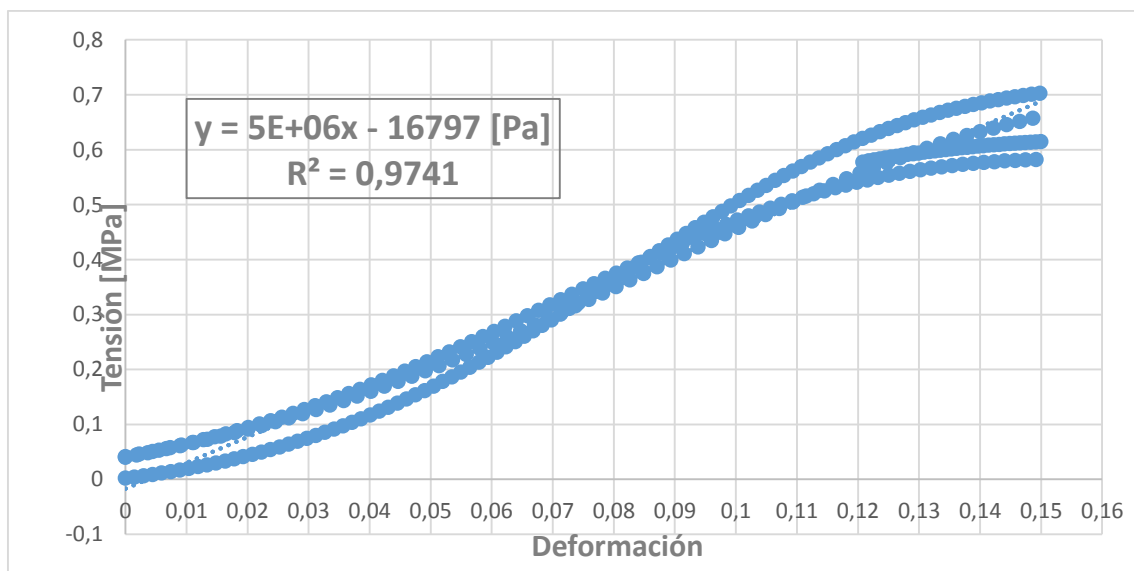


Figura 50. Tendencia de la pendiente E de la placa Poron 20236-65.

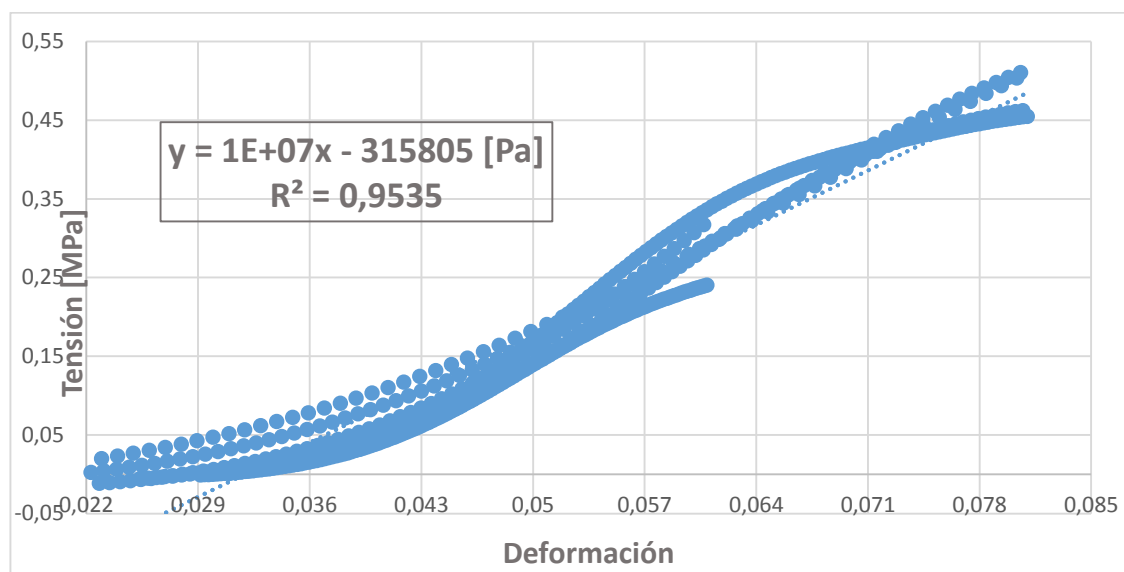


Figura 51. Tendencia de la pendiente E de la placa Poron XED-09625-65.

En vista de los resultados obtenidos en las ecuaciones de tendencia de las muestras, el Poron 20236-65 posee un módulo Young igual a 5 MPa, y el Poron XED-09625-65 tiene un módulo Young de 10 MPa. Por tanto, la resiliencia de este último es menor que la del Poron 20236-65.

Los coeficientes de determinación son superiores al 95% (0,9741 en el Poron 20236-65 y 0,9535 en Poron XED-09625-65).

Resulta interesante mencionar que pese a que los módulos elásticos que posee el Poron XED-09625-65 es el doble que el Poron 20236-65, los comportamientos de ambas muestras es muy similar en las distintas energías de impacto ensayadas. Este comportamiento semejante es debido a la diferencia de espesor que presentan ambas muestras del ensayo. Esto explica las observaciones apreciadas anteriormente [fuerza].

Dichos resultados son patentes en la siguiente tabla (Tabla 14):

Material poron	Módulo Young [MPa]	Espesor [mm]	E/e [N/mm ³]
20236-65	5	5,58	0,90
XED-09625-65	10	9,9	1,01

Tabla 14. Propiedades de las muestras ensayadas.

4.3.2 VELOCIDAD VS. TIEMPO

En este apartado se presenta la evolución de la velocidad frente al tiempo para cada material en cada una de las energías de impacto ensayadas (*Figura 52 y Figura 53*).

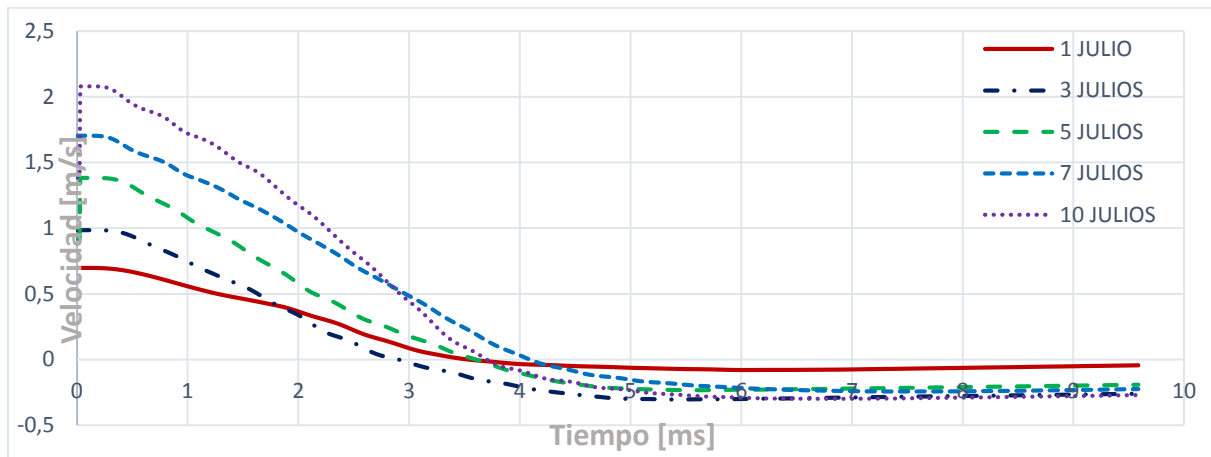


Figura 52. Representación del rango de la velocidad vs. el tiempo que soporta el Poron 20236-65.

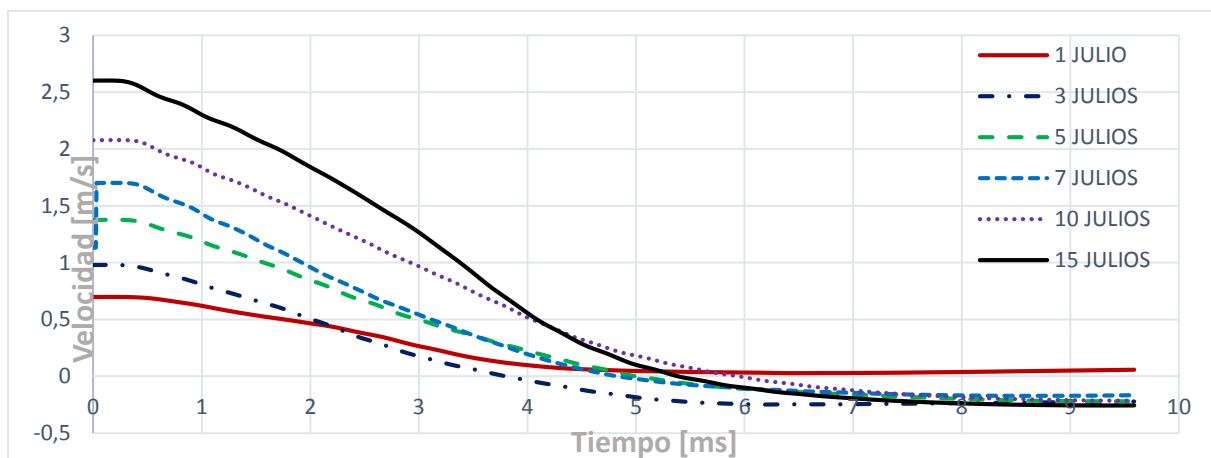


Figura 53. Representación del rango de la velocidad vs. el tiempo que soporta el Poron XED-09625-65.

Resulta interesante, como para valores de energías intermedias las curvas tienden a estabilizarse entre los cuatro y cinco milisegundos para el Poron 20236-65 y los cinco y seis milisegundos para el Poron XED-09625-65, excepto en el ensayo de tres julios. Posiblemente, este sea el tiempo de reacción frente al impacto de la estructura interna de las muestras.

A su vez, se aprecia como para las máximas energías de ensayo en ambas placas, 10 [J] en el Poron 20236-65 y 15 [J] en el Poron XED-09625-65, la pendiente comienza a descender más pronunciadamente, reduciendo así el tiempo de contacto percutor-placa.

4.3.3 DESPLAZAMIENTO VS. TIEMPO

En este apartado se presentan las curvas de desplazamiento para cada material en cada una de las energías de impacto ensayadas. Debido a que los datos han sido recopilados por los sensores del percutor en el impacto, los valores representados son positivos porque expresan el desplazamiento de la superficie de la placa con respecto al sistema de coordenadas de referencia de éste (*Figura 54 y Figura 55*).

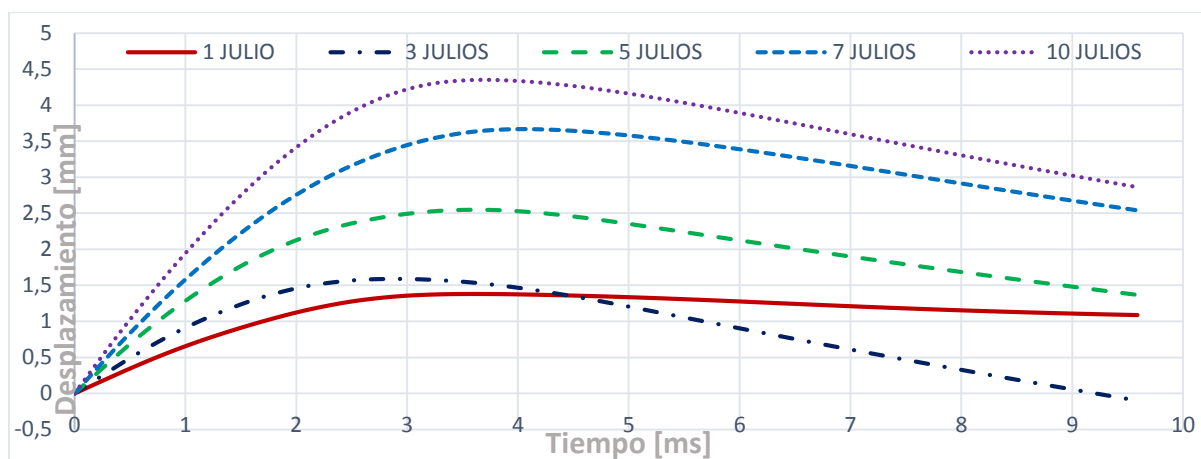


Figura 54. Representación del rango del desplazamiento vs. el tiempo que soporta el Poron 20236-65.

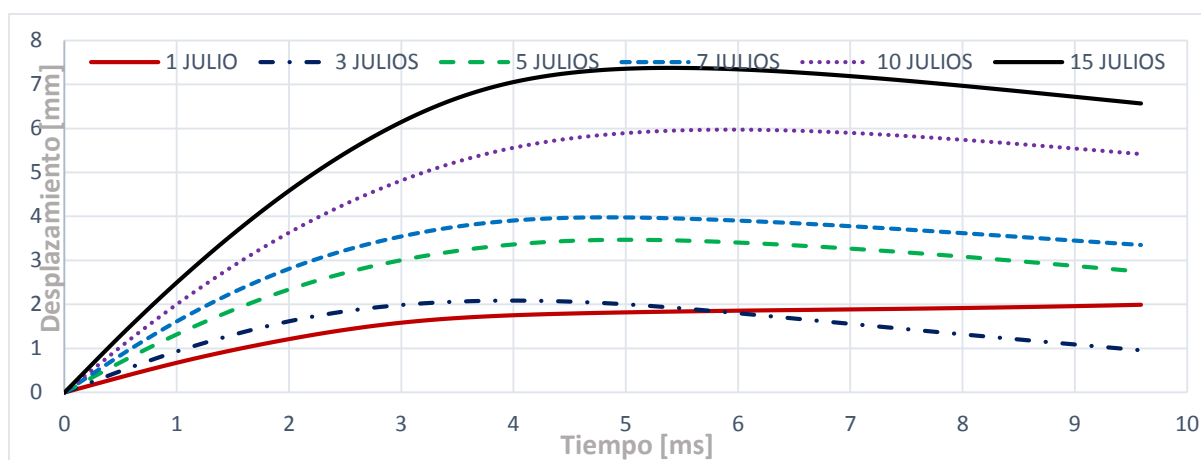


Figura 55. Representación del rango del desplazamiento vs. el tiempo que soporta el Poron XED-09625-65.

En las gráficas se puede observar que el desplazamiento vertical del percutor aumenta con la energía de impacto. En estos resultados también se aprecia un posible error en el ensayo efectuado a un 1 julio, donde la predisposición de estas curvas no se rige razonablemente con la realidad, ya que al tratarse de un material elástico debería recuperar su forma tras el impacto.

Con los datos anteriores conseguidos del desplazamiento, y conocidos los espesores de las muestras, se procede a calcular los valores de deformación para cada placa (*Figura 56 y Figura 57*).

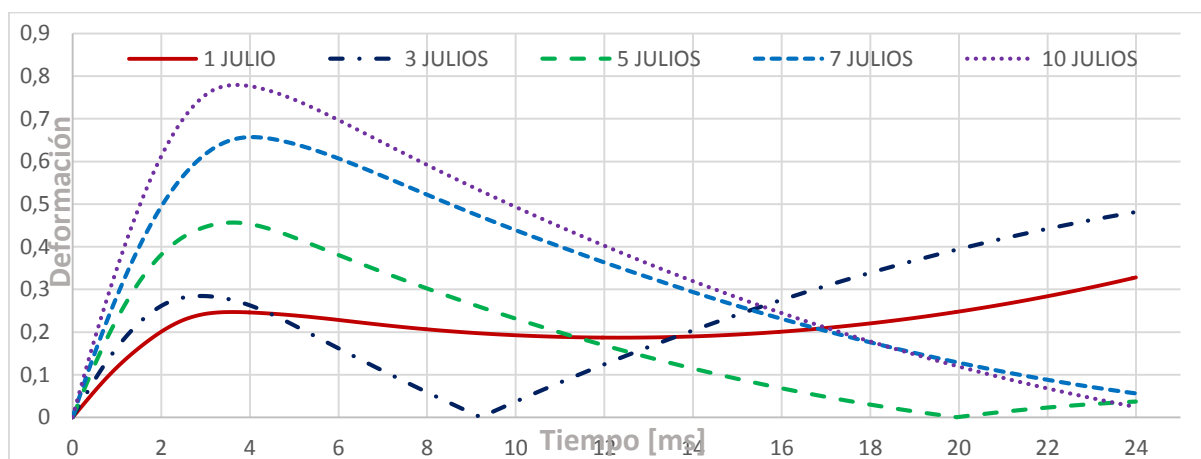


Figura 56. Gráfica de valores de la deformación ejercida experimentalmente sobre la placa Poron 20236-65.

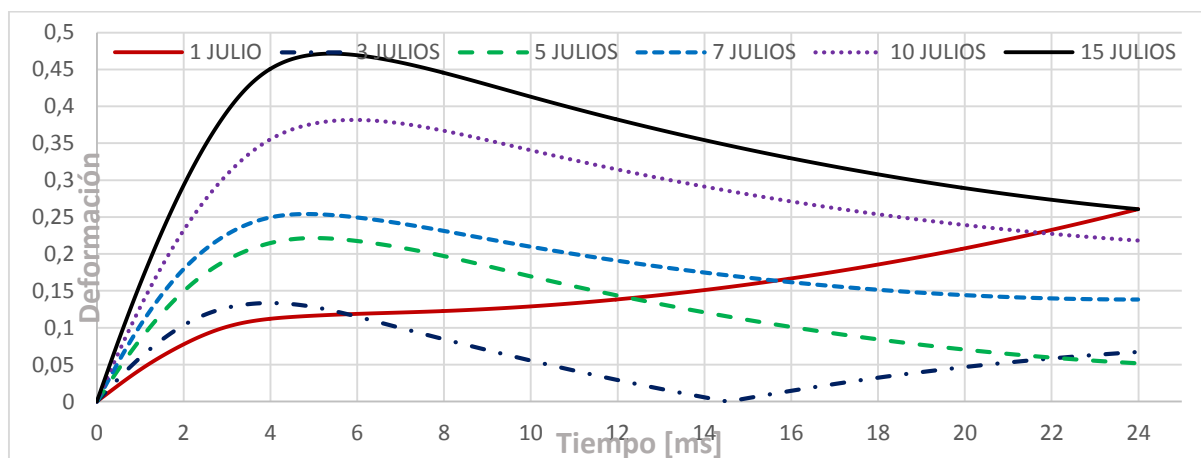


Figura 57. Gráfica de valores de la deformación ejercida experimentalmente sobre la placa Poron XED-09625-65.

En las curvas de deformación, se aprecia que el tiempo hasta alcanzar el valor máximo de deformación permanece más o menos constante al aumentar la energía de impacto. Es importante resaltar que al aumentar la energía de impacto, y por tanto su deformación, el intervalo de tiempo de contacto percutor-placa no se va reduciendo, excepto en los ensayos de tres julios en ambas muestras.

4.3.4 ENERGÍA VS. TIEMPO

En este apartado, se representan las curvas de energía absorbida para cada material en cada una de las energías de impacto ensayadas (*Figura 58 y Figura 59*).

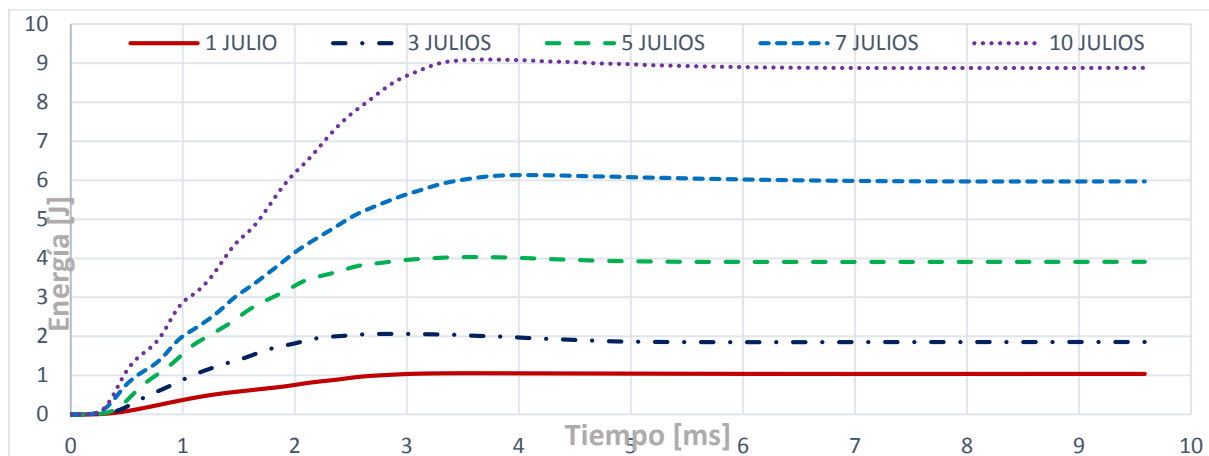


Figura 58. Representación del rango de energías vs. el tiempo que soporta el Poron 20236-65.

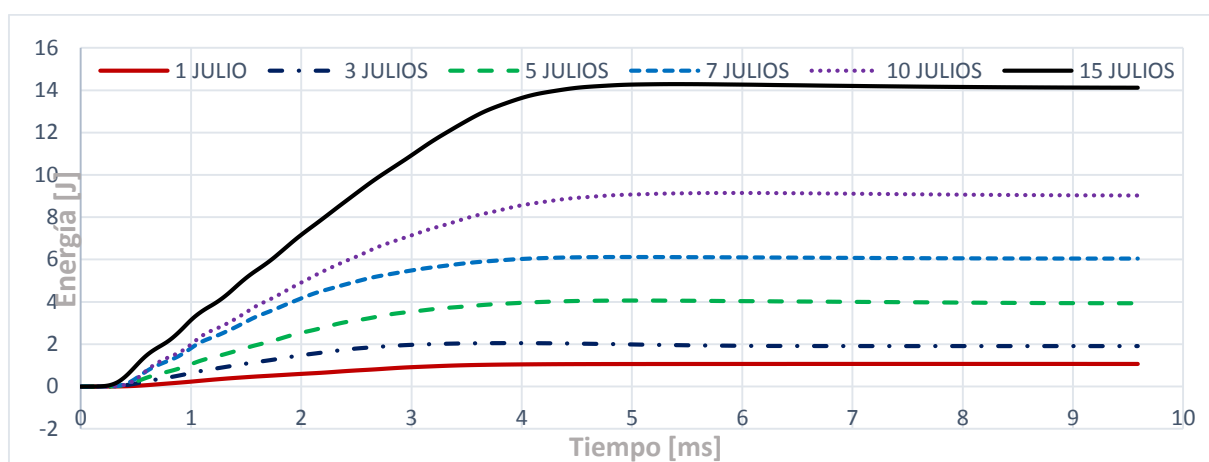


Figura 59. Representación del rango de energías vs. el tiempo que soporta el Poron XED-09625-65.

En estas gráficas se puede observar cómo la energía se incrementa hasta alcanzar un valor máximo, que se corresponde con el de la energía de impacto, y a partir de este valor la energía en vez de comenzar a disminuir levemente, se mantiene estable en un valor cercano a la energía de impacto. Este valor se corresponde con la energía absorbida por la probeta. Dichos valores de absorción del impacto de cada material se exponen en el siguiente gráfico de barras (*Figura 60*).

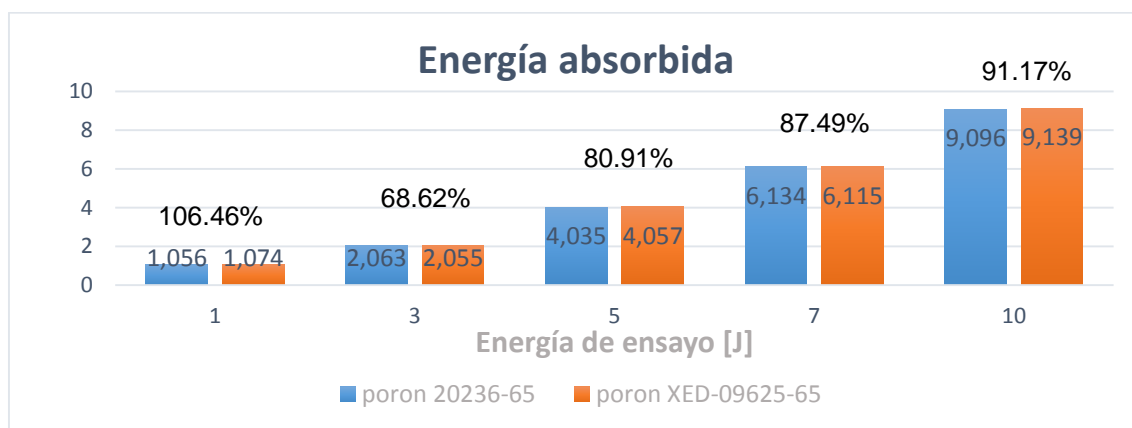


Figura 60. Gráfico comparativo de la cantidad de energía absorbida por cada material, y porcentaje promedio de absorción de la energía de impacto.

A la vista de los resultados obtenidos en las pruebas, los valores de absorción no concuerdan con lo calculado en los ensayos preliminares de caída libre con los rodamientos de bolas, donde se observaba una supuesta dependencia lineal entre la energía de impacto y la energía absorbida, y con un porcentaje casi invariable y superior al 95% de absorción de ambas placas.

En primer lugar, el error más significativo ocurre en los ensayos de 1 julio, donde los datos captados por los sensores del impactador son superiores a la energía dispuesta previamente para el ensayo. Este error puede deberse a un fallo en los transductores del sensor para valores tan bajos de energía. Posiblemente, la torre no este diseñada para estudiar este tipo de materiales y sería necesario emplear otro tipo de dispositivo experimental para valores tan bajos de energía.

Por otro lado, sí descartamos el ensayo de 1 [J] por el posible error cometido, y se representa la línea de tendencia de la capacidad de absorción, se observa que los niveles de energía que es capaz de amortiguar los dos materiales Poron aumentan conforme mayor es la energía de impacto (*Figura 61*).

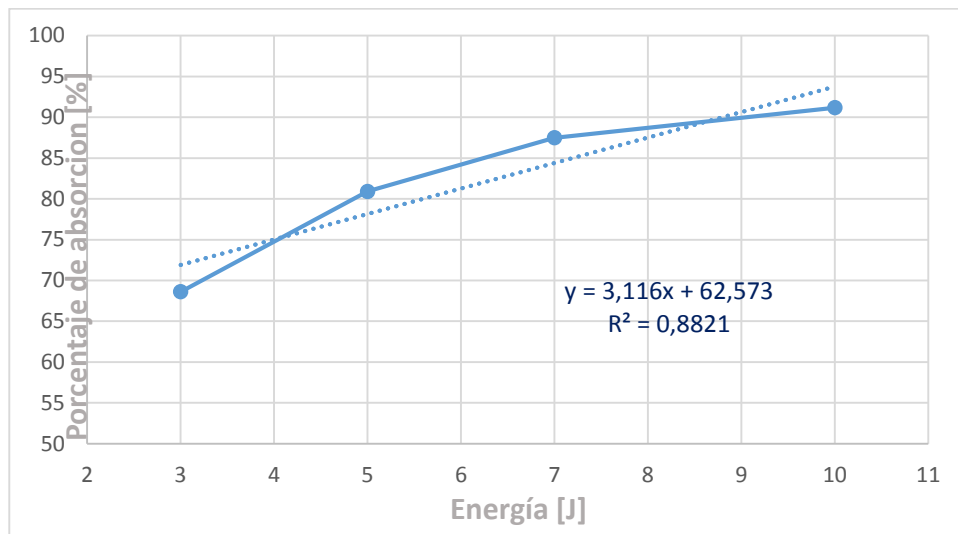


Figura 61. Línea de tendencia promedio de absorción de impactos de las muestras.

De esta manera, podemos considerar aceptables las posibles predicciones que usen de base este modelo, ya que el ajuste por mínimos cuadrados para las muestras posee una relación lineal entre sus variables con un coeficiente de correlación mayor de 0.88.

Se aprecia como el porcentaje de energía absorbida media aumenta acorde mayor es la energía de impacto. Para la placa Poron XED-09625-65 sometida a un ensayo de 15 julios, la energía absorbida alcanzó los 14,285 julios, es decir, se absorbió un 95,23 % del impacto. Esto destaca la capacidad de absorción de estos materiales, y contrasta la progresión de la tendencia representada en la Figura 61.

También mencionar, que estos valores son similares a los logrados en los ensayos con rodamientos de bolas, donde se apreciaba una tendencia similar [\[Figura 36\]](#).

4.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VIDEO

En este apartado se presentan las curvas del ensayo de la torre de caída de peso. Los valores representados son los obtenidos por el sistema de adquisición de la torre, y los datos de los videos realizados durante su ejecución y analizados posteriormente con el programa *Tracker*. En cada gráfica se pueden observar los distintos comportamientos que existen entre ambas placas, separando por las categorías de desplazamiento, velocidad y energía.

Debido a las diferencias del número de datos y del intervalo de tiempo que posee cada sondeo, se ha efectuado un ajuste a los valores del tracker para poder posibilitar la comparación. Mientras que el software de la torre de caída es capaz de registrar 4000 datos en el transcurso del ensayo, el programa tracker como es evidente, sólo puede estudiar el procedimiento frame a frame, con lo que se obtienen apenas 70 datos desde el mismo instante del impacto con la placa hasta que se alcanza el rebote máximo del impactador.

Además, a medida que el programa integra los valores que registra de la posición del punto de rastreo del video para obtener la velocidad y la energía, se visualizan mayores discontinuidades en las gráficas. Por estas razones las curvas del tracker no presentan una linealidad manifiesta como en las obtenidas a través del *DAS 4000*. En este caso, no se ha realizado un filtrado de las curvas elaboradas por el tracker para lograr un cotejo real de los resultados. De esta misma manera, se han obviado las posibles comparaciones de los valores de la fuerza, ya que el programa tracker presentaba demasiados errores y limitaciones a la hora de hallar su integración (*Figura 62*).

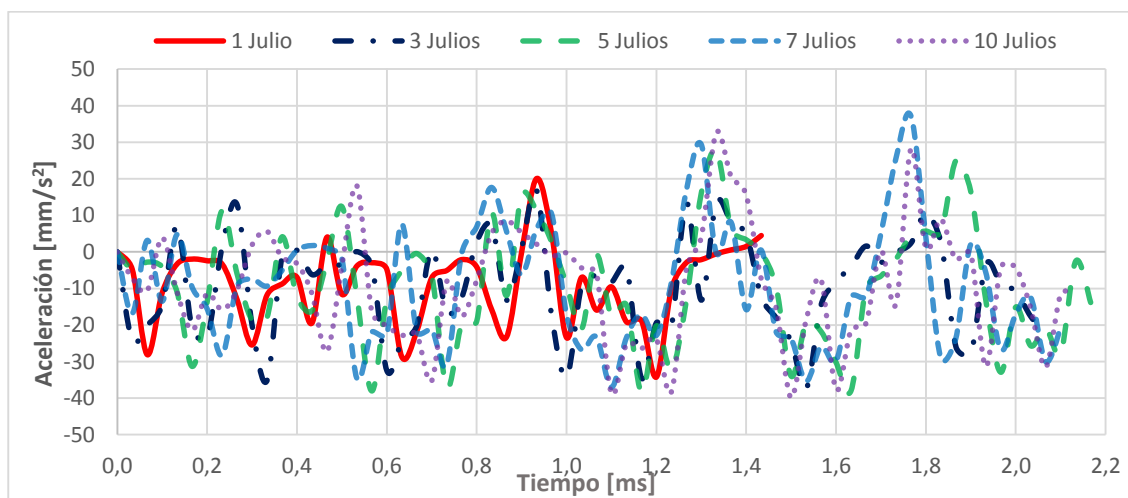
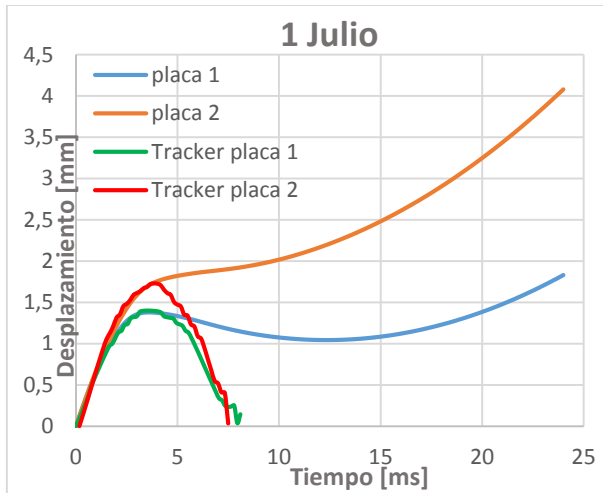
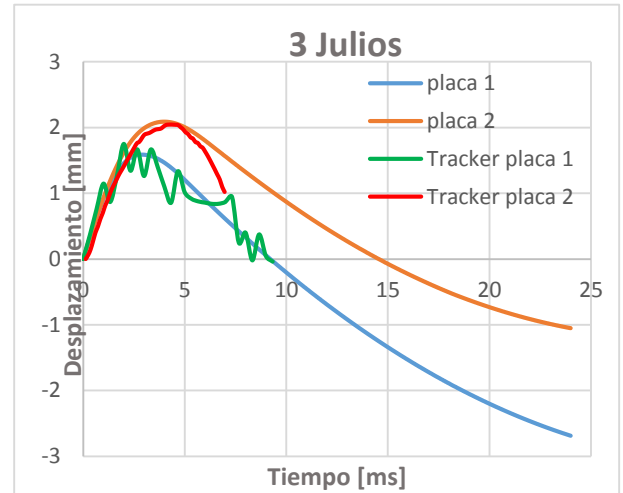


Figura 62. Representación de los valores de aceleración obtenidos del programa tracker para cada rango de energía.

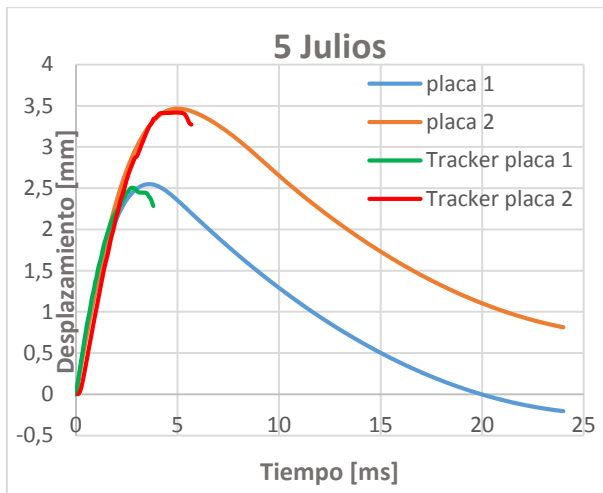
4.4.1 DESPLAZAMIENTO



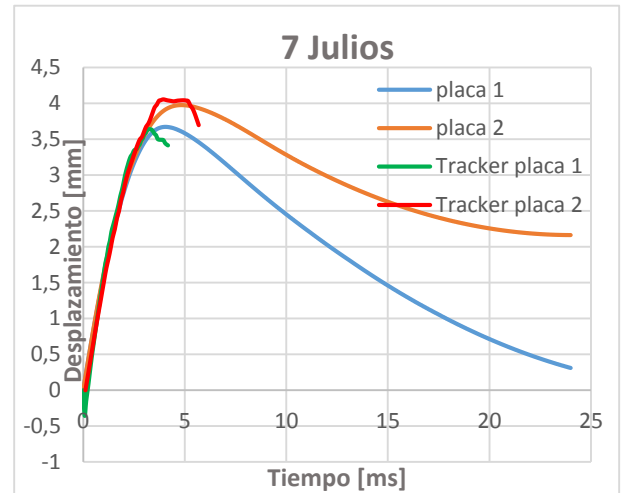
Desplazamiento a 1 Julio.



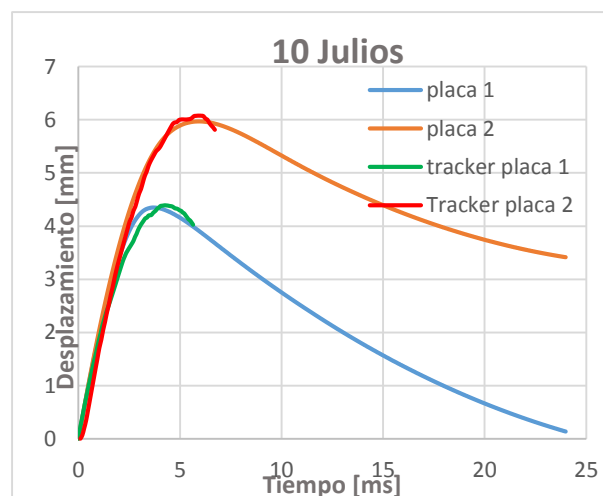
Desplazamiento a 3 Julios.



Desplazamiento a 5 Julios.



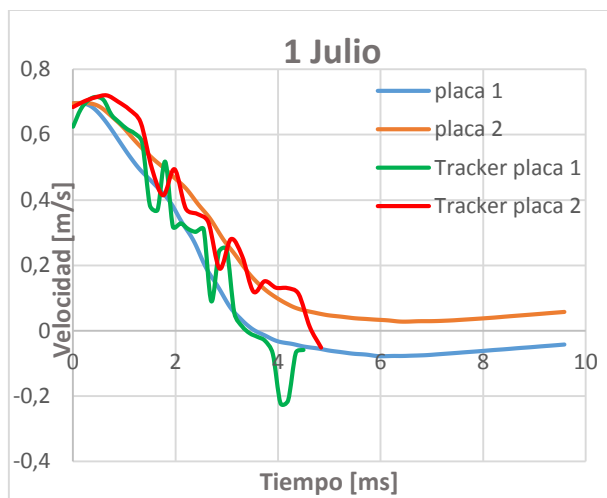
Desplazamiento a 7 Julios.



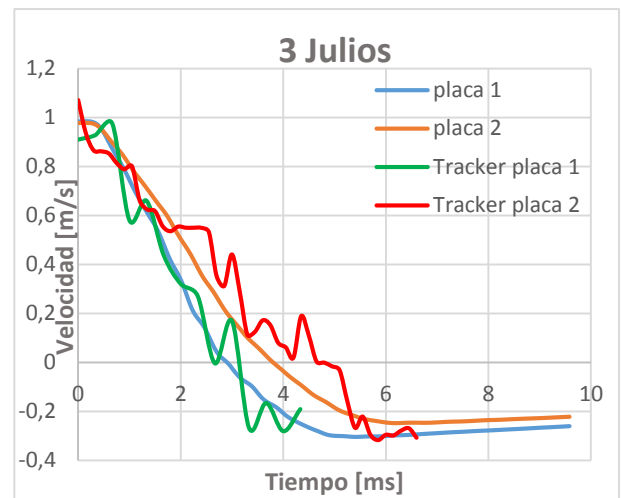
Desplazamiento a 10 Julios.

Figura 63. Representación de los Desplazamientos.

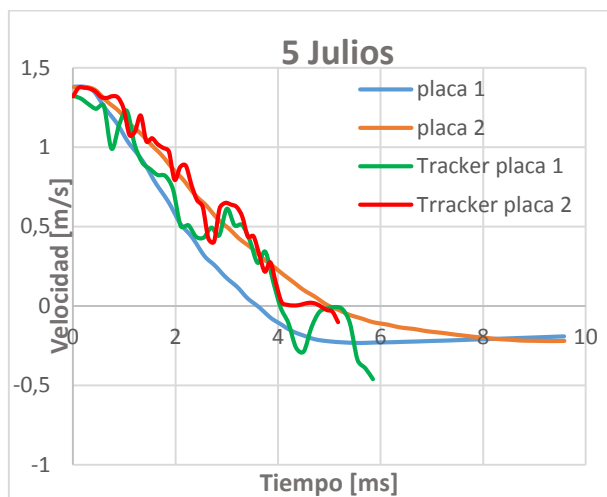
4.4.2 VELOCIDAD



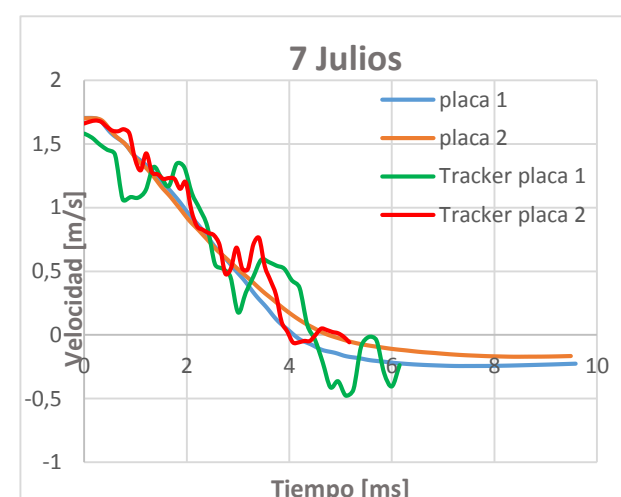
Velocidad a 1 Julio.



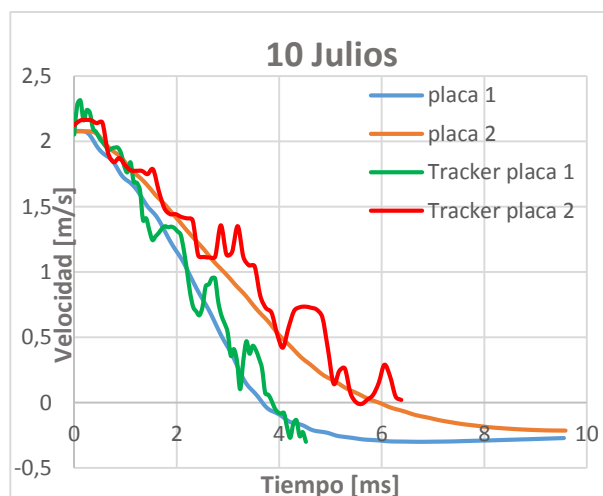
Velocidad a 3 Julios.



Velocidad a 5 Julios.



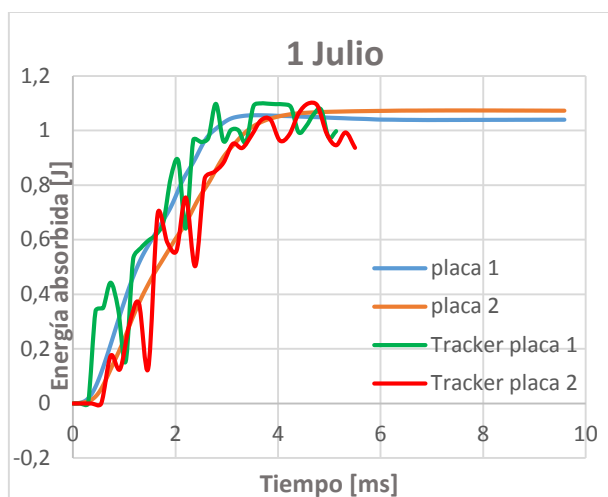
Velocidad a 7 Julios.



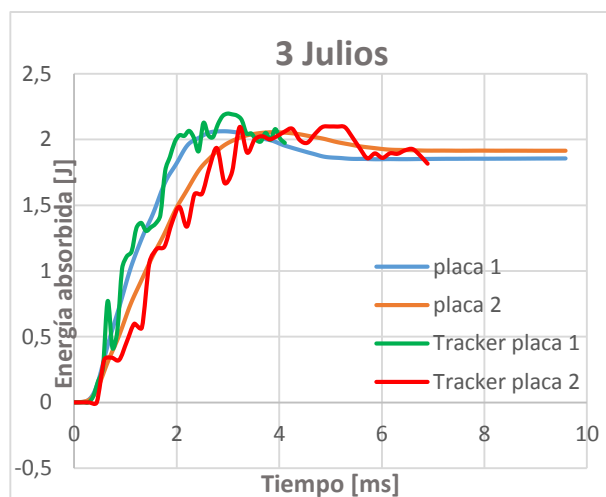
Velocidad a 10 Julios.

Figura 64. Representación de las velocidades.

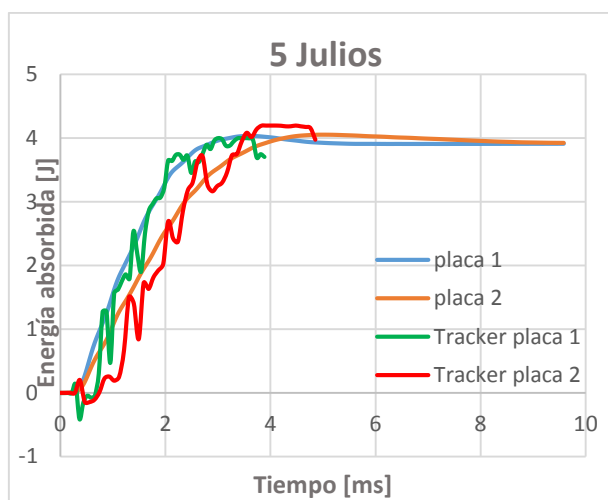
4.4.3 ENERGÍA



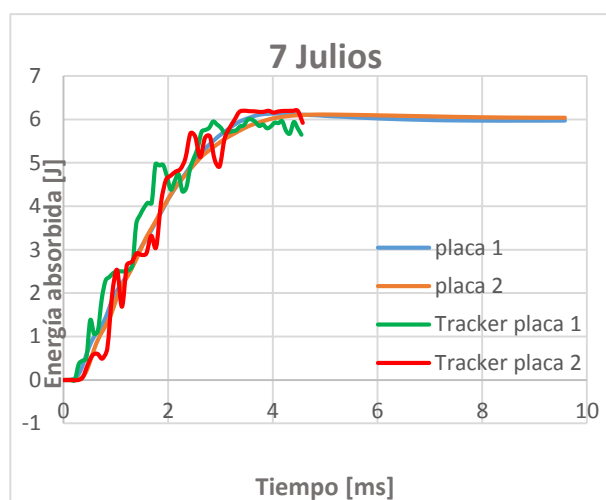
Energía a 1 Julio.



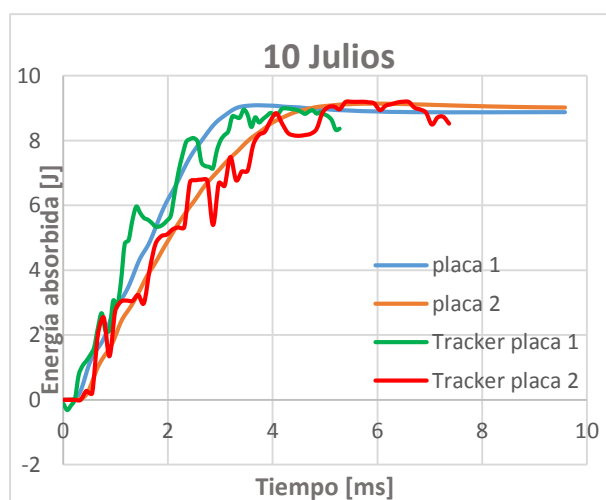
Energía a 3 Julios.



Energía a 5 Julios.



Energía a 7 Julios.



Energía a 10 Julios.

Figura 65. Representación de las energías.

A la vista de las curvas antes expuestas, puede confirmarse la validez del uso de análisis de video. Sin embargo, la consecución de datos por integración arrastra errores cometidos en la fase inicial de rastreo de posición, y por ello no resulta del todo factible su utilización para el cálculo de aceleraciones. Estos errores son visibles en las gráficas de velocidad, en especial en los ensayos de 5 y 7 julios, donde las curvas obtenidas por el tracker no son del todo consecuentes con lo realmente ocurrido en método experimental.

Por otro lado, como se puede apreciar en las gráficas anteriores, ambas muestras presentan diferencias en el comportamiento frente a la misma intensidad de energía en los ensayos. A continuación se detallan las diferencias más significativas dentro del ámbito del estudio.

Primeramente, se debe puntualizar que los ensayos de realizados a 1 y 3 julios no son representativos de la realidad. El motivo de este error de adquisición de datos es la baja energía del ensayo. Se aprecia como estos valores son subcríticos y se encuentran por debajo del valor umbral de los sensores del percutor. Por esto, en la mayoría de los análisis de resultados posteriores se obviarán tales ensayos.

- En las curvas de Desplazamiento – Tiempo (*Figura 63*), se visualiza una tendencia similar en ambas muestras, con un comportamiento típico frente a impactos. La diferencia existente entre las muestras es la de sus espesores: la placa Poron 20236-65 posee un espesor de 5,583 mm, y el Poron XED-09625-65 de 9,9 mm. En el ensayo de 10 julios se puede verificar que mientras la placa 1 llega a valores más próximos de densificación, la placa 2 apenas se deforma para las energías de ensayo aplicadas. A su vez, para los ensayos de mayor energía de impacto, la placa 2 presenta un lapso temporal superior en la recuperación de su espesor original. Esto puede ser provocado por la mayor cantidad de huecos internos de su microestructura con respecto a la placa 1.

- En todas las curvas de Velocidad – Tiempo (*Figura 64*), se observa una mayor amortiguación del impactador en la placa 2. Aunque en este caso, el poseer un módulo de Young mayor es secundario, estos resultados son los esperados. Esto es debido a que esta muestra tiene un espesor mayor y una densidad menor. De esta manera, dicha probeta alberga una gran cantidad de espacios internos ocupados, en ausencia de esfuerzos, por burbujas de aire. Esta mayor porosidad en le confiere a la placa una gran capacidad de amortiguación del impacto.

- De nuevo, en las curvas de Energía absorbida – Tiempo (*Figura 65*), se aprecia un pequeño desfase en el comportamiento frente a impacto debido a las distintas propiedades de las muestras. De este modo, la placa 1 tarda menos tiempo en absorber el impacto, y esta disposición va aumentando conforme aumenta la energía del ensayo. Este resultado entra dentro de lo esperado, ya que, como hemos visto antes, dicha muestra alcanza una mayor densificación y posee menor poder de amortiguación.

4.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se realizará un estudio de comparación de los distintos comportamientos que presentan las muestras frente a los ensayos de impacto reproducidos experimentalmente en este trabajo. Para ello se tomarán los valores máximos de los diversos parámetros obtenidos en la torre de caída de peso. Estos datos máximos son determinantes a la hora de elegir un material u otro. De esta forma, se cotejarán los valores más representativos que son capaces de alcanzar las muestras.

4.5.1 DEFORMACIÓN MÁXIMA

Sobre los distintos ensayos realizados, se han extraído los valores de deformación máxima en cada uno de ellos. En el siguiente gráfico (*Figura 66*) se expone la vinculación existente entre la deformación máxima que sufren las probetas y las diferentes energías de impacto ensayadas.

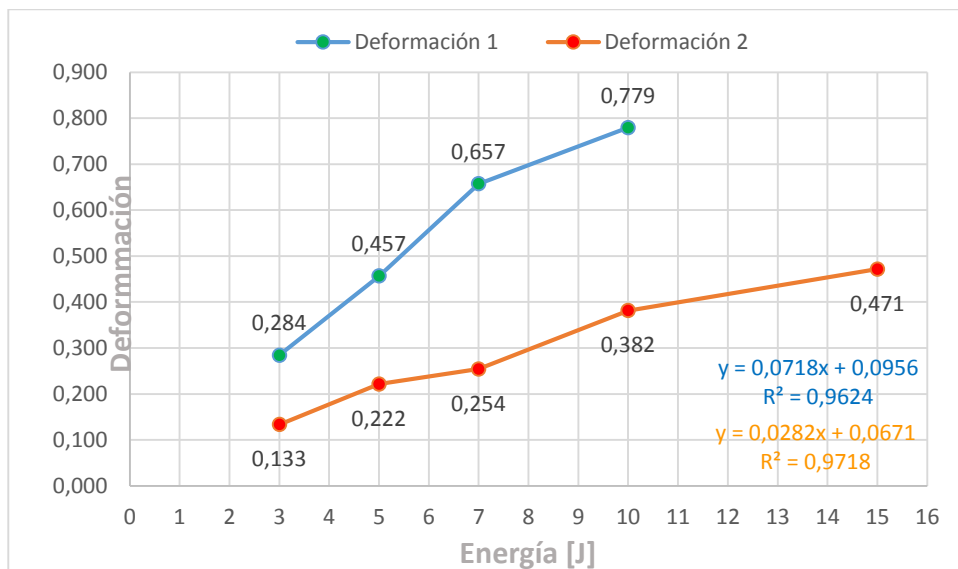


Figura 66. Representación de la deformación máxima vs. la energía de impacto.

Observando las curvas de la gráfica anterior, se puede visualizar fácilmente la mayor compactación, y por tanto densificación, de la placa 1 frente a la 2 para todas las energías de ensayo. Esto se debe a la diferencia de densidad y espesor que poseen las muestras. Como se comentó anteriormente [Figura 12], la placa 2 presenta una menor densidad y mayor espesor. Esto hace que posea mayor porosidad, lo cual le otorga una mayor capacidad de absorción. Durante el impacto, los huecos internos se comprimen y desalo-

jan el aire que contienen, provocando una mayor disipación de energía frente a menores deformaciones.

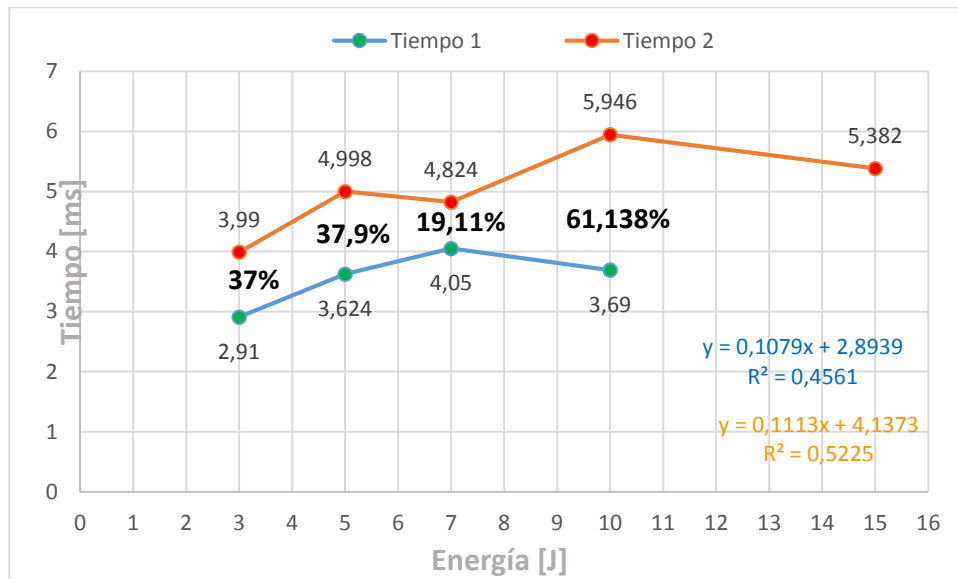


Figura 67. Representación del tiempo transcurrido hasta la deformación máxima vs. la energía de impacto.

En esta otra gráfica (*Figura 67*), se representa el tiempo transcurrido hasta lograr la deformación máxima para cada rango de energía. En ella se puede apreciar la diferencia temporal que necesita cada muestra para ser capaz de absorber el impacto recibido. Mientras que en la placa 1 se transfiere la energía de manera muy rápida, la placa 2 necesita de media un 38,8% más de tiempo.

4.5.2 VELOCIDAD MÁXIMA DE REBOTE

Analizando las pruebas realizadas, se ha adquirido el valor de la velocidad máxima de rebote lograda por el percutor en cada uno de ellos. En la siguiente curva (*Figura 68*) se muestra la relación entre la velocidad máxima de rebote que adquiere el impactador y los diferentes niveles de energía de impacto ensayados.

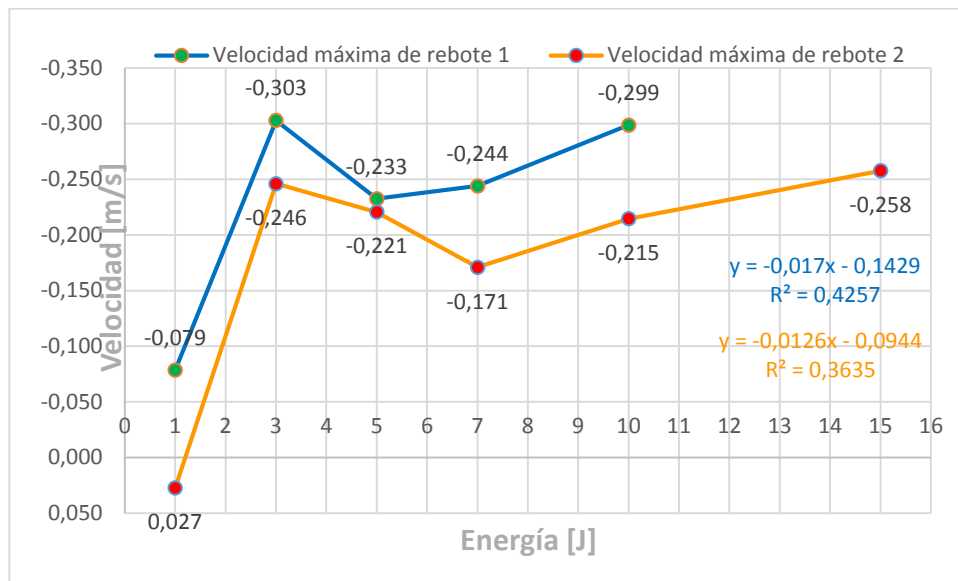


Figura 68. Representación de la velocidad máxima de rebote vs. la energía de impacto.

En estas curvas se logra distinguir la reacción frente a impactos de las dos muestras. La placa 1 absorbe menos energía en el impacto que la placa 2. Esto es debido a la condición de menor espesor que tiene esta, de manera que se alcanza un mayor grado de densificación como se pudo ver en la representación gráfica del apartado anterior [4.5.1].

También podemos observar como en el ensayo de 1 julio aparece el mismo error en la captación de los datos, siendo más apreciable en la placa 2.

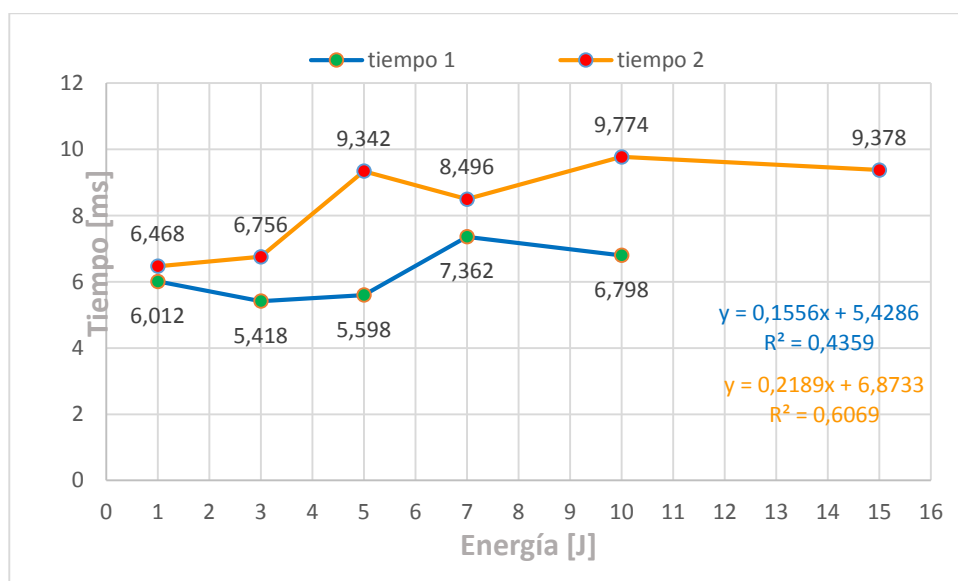


Figura 69. Representación del tiempo transcurrido hasta la velocidad máxima de rebote vs. la energía de impacto.

En esta otra gráfica (*Figura 69*), se puede vislumbrar el tiempo que tarda el percutor en alcanzar la velocidad máxima de rebote para cada energía ensayada. De esta forma se puede prever que el tiempo de contacto es mayor en la placa 2, y por tanto asegurar que esta posee mayor capacidad de amortiguación del impacto.

4.5.3 FUERZA MÁXIMA

A través de los registros de fuerza de los distintos ensayos realizados, se ha obtenido el valor de la fuerza máxima alcanzada por en cada uno de ellos. En la siguiente gráfica (*Figura 70*) se presenta la relación existente entre la fuerza máxima ejercida por el percutor sobre las probetas y las diferentes energías de impacto ensayadas.

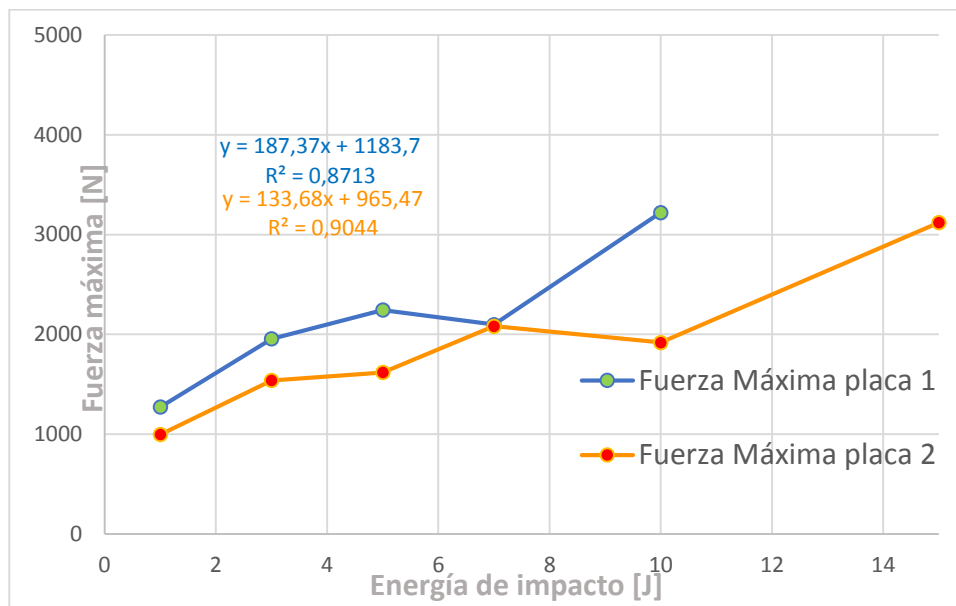


Figura 70. Representación de la fuerza máxima vs. la energía de impacto.

En vista de los resultados obtenidos, podemos apreciar que existe una relación directa entre la fuerza máxima que sufren las placas y la energía absorbida por estas. Cabe destacar el impacto de siete julios, donde ambas placas sufren una fuerza máxima similar, con la gran diferencia de que mientras la placa 2 (Poron XED-09625-65) alcanza un máximo local característico para este ensayo, el Poron 20236-65 disminuye su tendencia. Esta es la razón por la cual la tendencia es mayor en la muestra de Poron XED-09625-65 que en el Poron 20236-65. Además, la placa 2 absorbe mayor cantidad de energía, de manera que la aceleración del impactador es menor, y con ello la fuerza de indentación.



CAPÍTULO 5

MODELIZACIÓN NUMÉRICA

5.1 INTRODUCCIÓN

La finalidad de estas simulaciones es encontrar un material capaz de simular el comportamiento de la espuma durante el impacto.

En este capítulo se describen los diferentes pasos para la creación del modelo simulado por ordenador. Este capítulo se divide en cuatro apartados:

En el primer apartado se concretarán las propiedades y los parámetros establecidos para la creación del modelo de elementos finitos en *LS-Dyna®* (27).

En el segundo apartado, se detallan las geometrías y los distintos materiales utilizados en las simulaciones (27).

En el tercer bloque, se muestran los resultados obtenidos en las distintas simulaciones que se han llevado a cabo.

Por último en el cuarto apartado, se analizan los resultados de la simulación FEM y se compara la utilización de los distintos materiales.

5.2 CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno iniciales que se han implementado en la simulación numérica son las expuestas:

- Restricción de movimiento

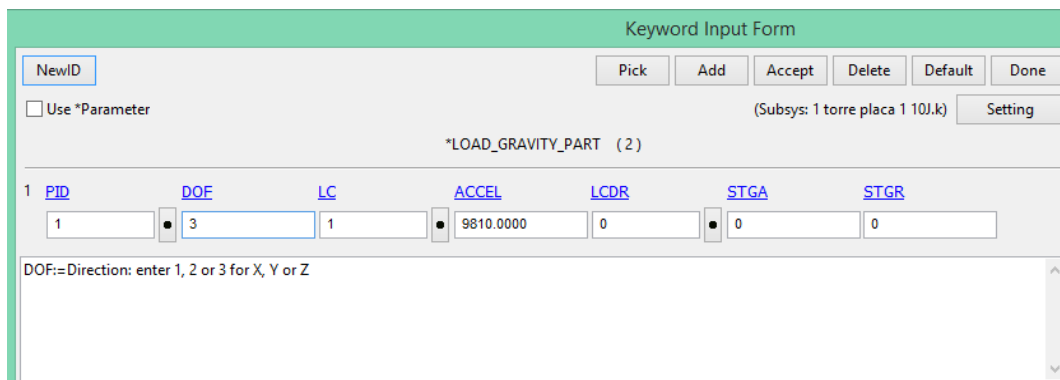
La única restricción que se ha efectuado en la simulación numérica es la colocación de una pared rígida ("*Rigidwall*") en la base donde se sitúa la muestra. Esta pared simula el suelo o la placa del sistema de agarre de la torre, ya que se explicó anteriormente que las muestras no estaban sujetas a ningún impedimento en su movimiento en el ensayo de impacto.

- Aplicación de cargas

Las cargas aplicadas al modelo son nulas. Tan sólo se considera el peso propio de los elementos, lo cual se consigue al aplicar la aceleración del campo gravitatorio terrestre.

- Aceleración de la gravedad

La aceleración de la gravedad se aplica a la muestra y al proyectil. Para ello se debe crear una curva representativa de la carga para cada instante de tiempo. En nuestro caso la carga no es variable, con lo que la definiremos en tan sólo dos puntos, uno en $t=0$ y otro en $t=1 \cdot 10^{10}$ con un valor de 1, de manera que al “cargar” dicha curva (“LC” en la Figura 71) adquiere para los tiempos marcados el valor de aceleración deseado, 9.81 m/s^2 .



PID	DOF	LC	ACCEL	LCDR	STGA	STGR
1	3	1	9810.0000	0	0	0

DOF:=Direction: enter 1, 2 or 3 for X, Y or Z

Figura 71. Captura de la tarjeta “Load_gravity_part”.

- Velocidad inicial

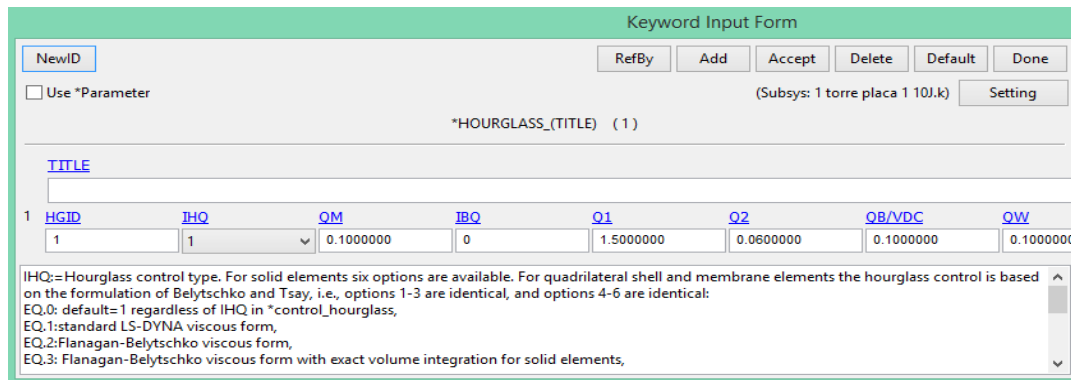
La manera de implementar el suceso de impacto por la caída libre del proyectil, no es la forma más eficiente numéricamente. De este modo, se ha representado este comportamiento a través de una velocidad inicial dada al proyectil, y colocar dicho proyectil cerca de la muestra. En este paso se han despreciado las condiciones de rozamiento contra el aire.

- Tiempo del ensayo

El tiempo de simulación se reduce lo máximo posible hasta momentos posteriores al impacto. En el proceso del caso experimental, el intervalo de tiempo característico del ensayo se alcanza a 20ms. Se utilizará un lapso de tiempo adicional previo al propio impacto donde se le dotará al proyectil, situado en una posición cercana a las muestras, de una velocidad inicial para la simulación del impacto. De esta manera se establece un tiempo de 30 ms (0.030 s) para el desarrollo del cálculo, y así garantizar que se abarca el tiempo necesario para la consecución del estudio.

• Hourglass

En elementos de integración reducida, muy utilizados en programación explícita para reducir el tiempo de ejecución dedicado a los cálculos en cada elemento, suelen aparecer problemas de hourglass. En caso del modelo estudiado, se ha usado la forma estándar de LS-Dyna para prevenir el hourglass y lograr la correcta resolución del problema (*Figura 72*).



Keyword Input Form

NewID

☐ Use *Parameter (Subsys: 1 torre placa 1 10J.k)

*HOURLASS_(TITLE) (1)

TITLE

1	HGID	IHQ	QM	JBO	Q1	Q2	QB/VDC	QW
1	1	1	0.1000000	0	1.5000000	0.0600000	0.1000000	0.1000000

IHQ:=Hourglass control type. For solid elements six options are available. For quadrilateral shell and membrane elements the hourglass control is based on the formulation of Belytschko and Tsay, i.e., options 1-3 are identical, and options 4-6 are identical:
EQ.0: default=1 regardless of IHQ in *control_hourglass,
EQ.1: standard LS-DYNA viscous form,
EQ.2: Flanagan-Belytschko viscous form,
EQ.3: Flanagan-Belytschko viscous form with exact volume integration for solid elements,

Figura 72 Captura de la tarjeta "Hourglass".

• Contactos e interacciones

La multitud de distintos tipos de contacto definidos en el programa *LS-Dyna*, sirven para comprender la dificultad que presentan estos algoritmos ante la posibilidad de analizar su comportamiento. Partiendo de esta idea, se debe conocer el ámbito de problema que acontece en este proyecto, donde se requiere de contactos sin penetraciones ni deformaciones permanentes (plásticas), y por ello se usarán contactos automáticos superficie-superficie (*Automatic_surface_to_surface*).

Para efectuar este contacto se deben especificar tres parámetros esenciales (*Figura 73*):

- SSID (slave segment ID): En este campo se suele introducir el proyectil.
- MSID (master segment ID): La superficie o elemento donde impacta, en este caso las muestras de Poron.
- SSTYP/MSTYP: En esta tarjeta se especifica el tipo de segmento que debe estudiar el programa durante el contacto, atendiendo a la elección realizada de área, volumen, superficie, etc. en el "set-data". Los más comunes son "Solid", "Part" y "Segment".

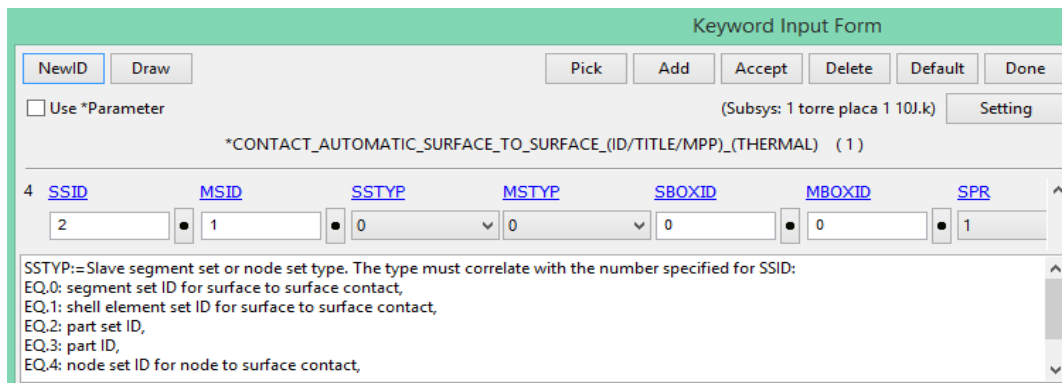


Figura 73. Captura de la tarjeta "Contact_Automatic_Surface_to_Surface".

Como se pretende obtener los resultados de las interacciones en la espuma, también se debe definir el contacto interior. Este contacto sólo puede ser definido para una pieza (part) del problema. Su función es asegurar la correcta solución del problema, abortando el cálculo de soluciones derivados de errores provocados por volúmenes negativos. Estos errores son muy frecuentes en compresiones de alta presión de materiales tipo espuma como la ensayada. Esta interrupción ahorrará tiempo de resolución del cálculo evitando dichos valores erróneos. Se elegirá por tanto la parte relativa a la espuma de poliuretano Poron (Figura 74).

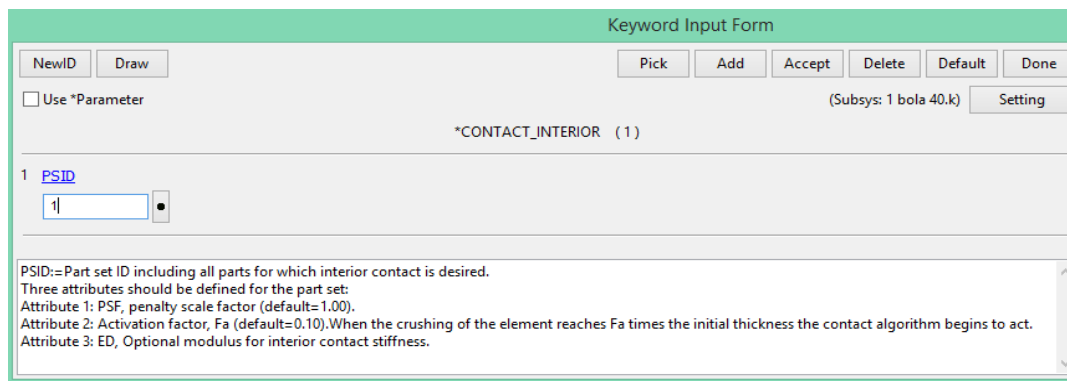


Figura 74. Captura de la tarjeta "Contact_Interior".

• Base de datos

La finalidad de toda simulación numérica es la obtención de los datos dispuestos en dicho análisis. Por esta razón se deben almacenar cada cierto intervalo de tiempo (paso del tiempo = $1 \cdot 10^{-5}$ s), los datos en un archivo de salida. Entre los diferentes datos que se pueden recopilar están: los datos de salida de elementos, los referentes a los nodos y un conjunto de datos de salida mediante ASCII. Los comandos que se han utilizado son (Tabla 15):

GLSTAT	MATSUM	NODOUT		
Energía cinética	Energía cinética	Desplazamiento x,y,z		
Energía interna	Energía interna	Velocidad x,y,z		
Energía total	Energía de hourglass	Rotación x,y,z		
Ratio	Impulso x,y,z	Velocidad angular x,y,z		
Energía de Stonewall	Velocidad cuerpo rígido x,y,z	Aceleración angular x,y,z		
Energías de muelle y amortiguador	Energía cinética total			
Energía de hourglass	Energía interna total			
Energía de amortiguamiento	Energía de hourglass total			
Trabajo externo				
Velocidad x,y,z				
Tiempo del paso				
Elemento que controla el tiempo de paso				
RBDOUT	SPCFORC	SLEOUT	RCFORC	
Desplazamiento x,y,z	Fuerza x,y,z	Energía esclava	Fuerza x,y,z	
Velocidad x,y,z	Momento x,y,z	Energía maestra		
Aceleración x,y,z				

Tabla 15. Datos de salida "Database_ASCII_option".

En la siguiente figura (Figura 75) se muestra un esquema de la disposición del ensayo.

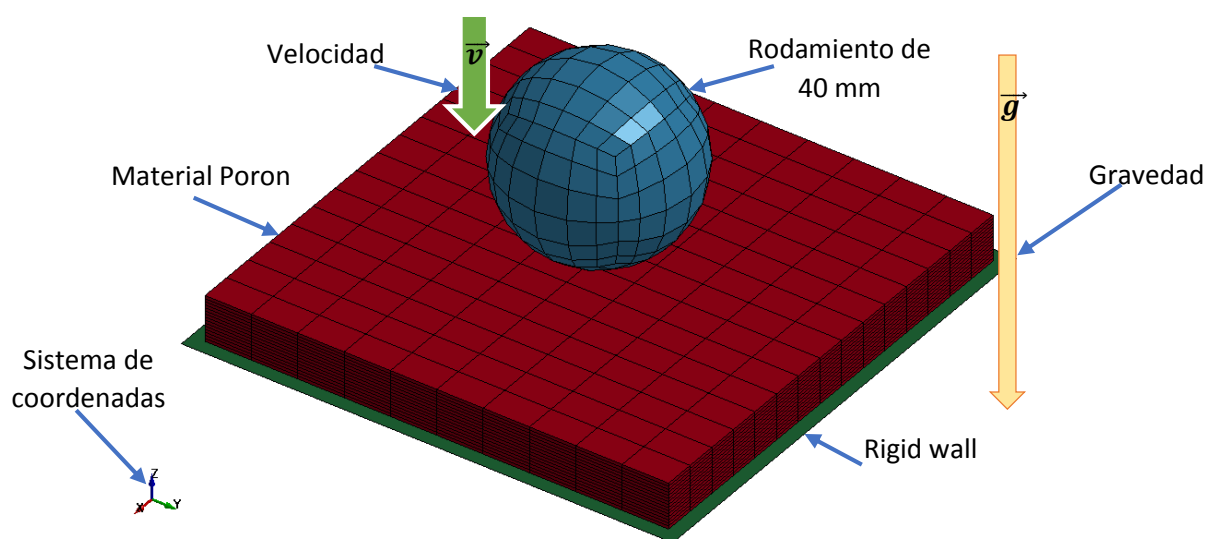


Figura 75. Esquema del ensayo de caída libre con sus condiciones de contorno.

5.3 GEOMETRÍAS, MALLADO Y MATERIALES

5.3.1 GEOMETRÍA Y MALLADO

- PERCUTOR Y BOLAS

En el caso del percutor se han utilizado simplificaciones geométricas ya que era necesario aglutinar toda la masa del sistema en un único elemento. Conocida la masa del sistema percutor utilizado en la torre de caída y el diámetro de la base plana del percutor (4.13 kg y 59 mm respectivamente), se determinó un sistema simplificado de menor tamaño. Para ello se usó el modelo “Cylinder_Solid” (Figura 76).

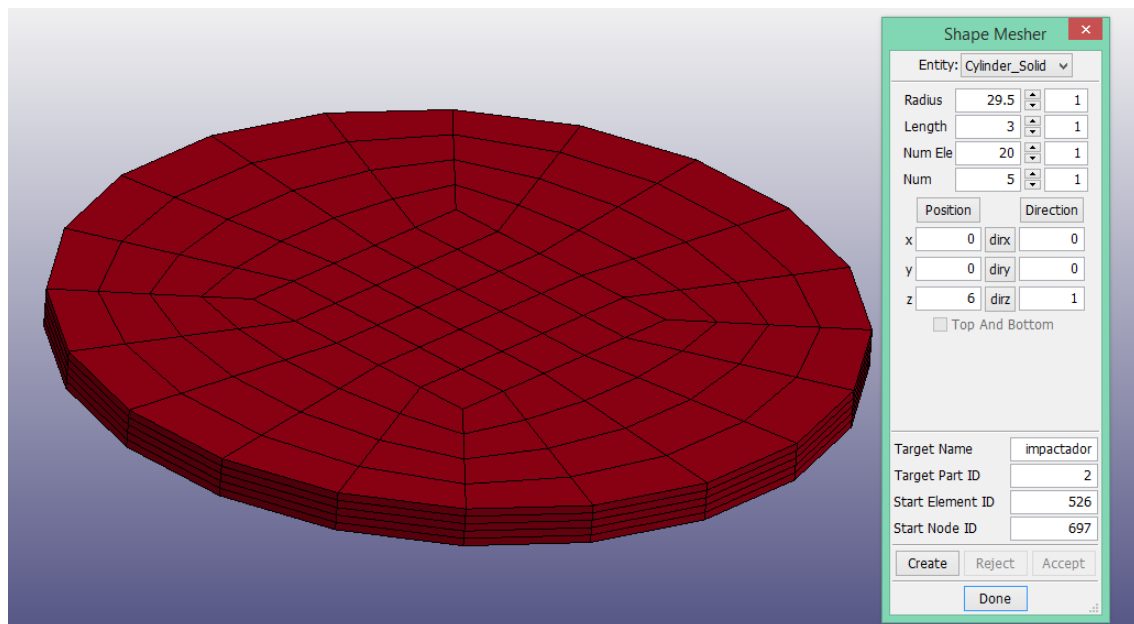


Figura 76. Geometría del Impactador

Los rodamientos de bolas se modelaron como “Sphere:Solid”. Se ha elegido este tipo de modelo en vez de “Sphere_Shell”, para asegurar la simulación del comportamiento rígido de las bolas reales.

Como podemos observar, el número de elementos del mallado de ambos tipos de “proyectiles” es muy bajo. Esto se ha hecho a propósito para reducir el tiempo de análisis de la simulación, debido a que estas piezas no interesan y además se sabe que no sufrirán deformación plástica alguna.

Por la misma razón de reducir el tiempo de simulación, la colocación de ambos proyectiles se posicionó a pocos milímetros de las muestras, y se les confirió la velocidad de impacto correspondiente.

• PLACAS PORON

Para simular el comportamiento de la placa con mayor exactitud se ha usado la geometría “Box_Solid” (Figura 77). De esta manera se obtienen las interacciones internas de la placa, explicadas anteriormente [contacto interior]. La malla realizada presenta diferentes divisiones en cada eje, siendo el más importante para nuestro estudio el eje donde se simula la compresión del impacto, el eje Z.

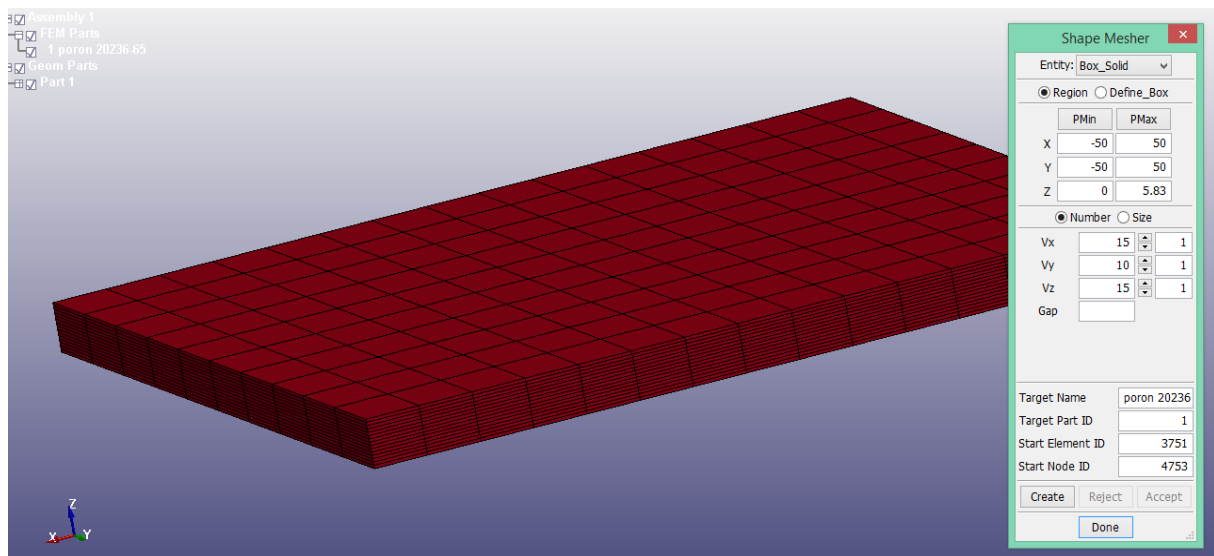


Figura 77. Geometría placa Poron 20236-65

5.3.2 MATERIALES

El programa *LS-Dyna*® posee la capacidad de definir 300 tipos de ecuaciones constitutivas de material, divididos según sus propiedades macroscópicas y la aplicación.

• PERCUTOR Y BOLAS

- La modelización del material del percutor se realizó tomando como referencia la cabeza del percutor real hecha de acero. Como este material es suficientemente resistente, no sufrirá deformaciones plásticas en el impacto. Para tener la misma masa que el sistema real, se recalculó la densidad que debería tener el conjunto con un espesor de 3 mm:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4.13}{\pi \cdot r^2 \cdot h} = 503541.0629 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Este cambio de densidad del sólido rígido no conlleva ninguna influencia en el impacto.

- Al igual que con el percutor, las esferas se crearon de acuerdo con el material real de las bolas, el acero. Esto es debido a que no se espera que estas se deformen plásticamente tras el impacto.

Recapitulando, el material seleccionado para ambos proyectiles es el acero, definido a través de la tarjeta “020-RIGID” en *LS_Dyna*, que simula un comportamiento indeformable manteniendo la disposición de los nodos rígidos tras el impacto (*Tabla 16*).

Propiedades	Bolas	Cilindro percutor
Densidad [Tn/mm ³]	7.85·10 ⁻⁹	5.03541·10 ⁻⁷
Modulo Young [MPa]		2·10 ⁵
Coefficiente de Poisson		0.3

Tabla 16 .Propiedades del material tipo rígido del impactador y los rodamientos de bolas.

• PLACAS PORON

Las placas de Poron son de una espuma de poliuretano de comportamiento viscoelástico. Como lo único que se conoce de estos materiales son la densidad y el modulo Young calculados en los ensayos experimentales, se busca un material de comportamiento similar. Los materiales que parecían más próximos al de la espuma Poron son el Mooney Rivlin y la espuma viscosa, definidos dentro del programa como “027-MOONEY-RIVLIN_RUBBER” y el “062-VISCOUS_FOAM” respectivamente.

- En primer lugar, se utilizó el material mooney rivlin (“027-Mooney-Rivlin_Rubber”). Este tipo de material fue explicado en el capítulo 2 [Mooney-Rivlin], con la diferencia de que este modelo hiperelástico en el programa es de primer orden, por lo que utiliza dos parámetros para ser definido, A y B. Debido a la falta de recursos para la determinación de los parámetros característicos del modelo, se optó por suponer estos valores y realizar un estudio de dependencia (*Figura 78*).

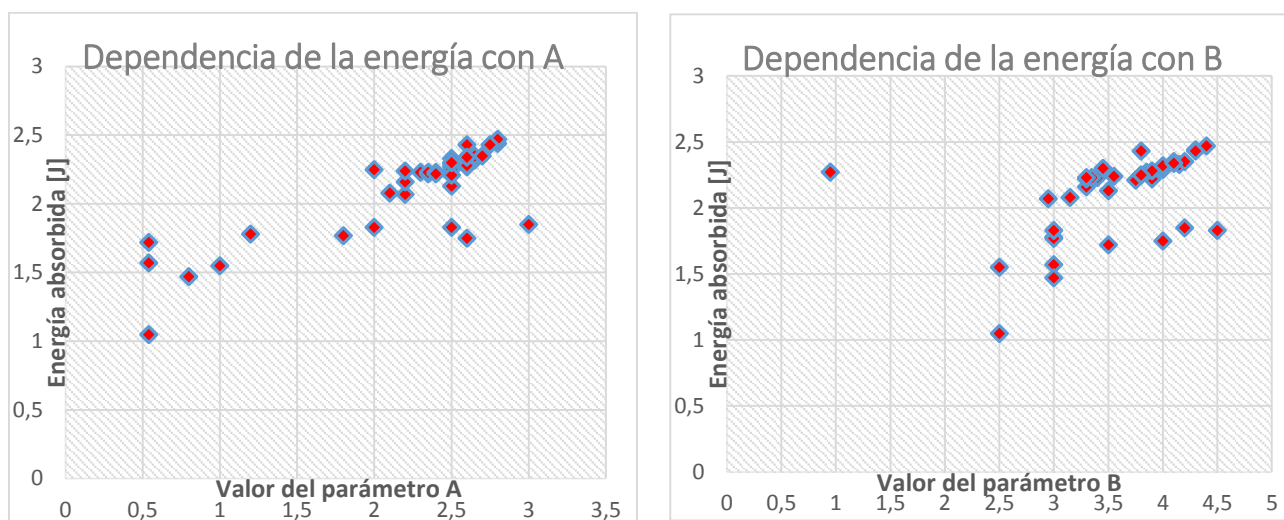


Figura 78. Gráficas de energía absorbida por el material en función de A y B. Simulaciones con bola de 40mm de diámetro desde 2 m ($v_i = -6260 \text{ mm/s}$) y 5 julios.

Como se puede observar en las gráficas anteriores, no existe una dependencia única del parámetro A o B con la energía que son capaces de absorber las muestras. La función de densidad de energía de deformación del modelo queda:

$$W = A(I - 3) + B(II - 3) + C(III^{-2} - 1) + D(III - 1)^2 \quad (5.1)$$

Dónde: $C = 0.5A + B \quad (5.2)$

$$D = \frac{A(5\nu - 2) + B(11\nu - 5)}{2(1 - 2\nu)} \quad (5.3)$$

ν es el coeficiente de poisson

$2(A + B)$ es el módulo de elasticidad transversal

I, II, III son los invariantes del tensor C de Cauchy-Green

Propiedades	Poron 20236-65	Poron XED-09625-65
Densidad [Tn/mm^3]	$3.4289 \cdot 10^{-10}$	$2.9703 \cdot 10^{-10}$
Coeficiente de Poisson	0.499	
Parámetro A [MPa]	1.5	
Parámetro B [MPa]	0.75	

Tabla 17. Propiedades del material tipo "Mooney_Rivlin_Rubber" de las muestras.

La mejor combinación efectuada se realizó con los valores de $A=1.5$ MPa y $B=0.75$ MPa (Tabla 17), obteniendo una energía máxima absorbida de 1.45 [J] sobre un ensayo de 5 [J]. Esto implica menos de un 30% de absorción posible con este tipo de material.

Al no manifestar el acercamiento esperado con el comportamiento real se descartó su uso.

- Después de no alcanzar los objetivos esperados con el modelo de material anterior, se probó con la espuma viscosa ("062-Viscous_Foam"). En este caso, el modelo no es exactamente igual al explicado anteriormente [\[viscoelástico\]](#). Este otro modelo fue diseñado para comprobar el confort de la espuma bajo el costado del ocupante en las pruebas de choque de automóviles con maniquís de colisión lateral (Euro-SID). Por lo tanto, este material es válido para elementos sólidos bajo carga de compresión como el del presente proyecto. El modelo a su vez es más complejo que el anterior, de manera que este consta de cinco variables en vez de dos, y son descritas a continuación:

E_1 Módulo de Young inicial.

N_1 Exponente de energía para el módulo de Young.

V_2 Coeficiente viscoso.

E_2 Módulo elástico de viscosidad.

N_2 Exponente de energía para la viscosidad.

Este modelo consta de una rigidez elástica no lineal en paralelo con un amortiguador viscoso. La rigidez elástica limita la deformación por compresión, mientras que la viscosidad absorbe la energía. Tanto los parámetros E_1 como V_2 tienen un comportamiento no lineal frente a la deformación:

$$E_1^t = E_1(V^{-n_1}) \quad V_2^t = V_2|1 - V|^{n_2} \quad (5.4 \text{ y } 5.5)$$

Siendo: V el volumen relativo, definido por la relación de volumen actual y el volumen inicial.

Tras la realización de los ensayos experimentales, se adquirieron los valores de módulos de Young de las muestras. De igual manera que ocurría en el caso anterior, no hubo recursos para la posible determinación del resto de variables, por lo que se presumieron

dentro del rango de proporción que presenta el ejemplo del manual de materiales del pro-

grama LS-Dyna (Figura 79 y Tabla 18).

Card 1	1	2	3	4	5	6	7	8
Variable	MID	R0	E1	N1	V2	E2	N2	PR
Value			0.0036	4.0	0.0015	100.0	0.2	0.05

Figura 79. Tabla con valores típicos en N,mm,s para el material "Viscous_foam".

Propiedades	Poron 20236-65	Poron XED-09625-65
Densidad [Tn/mm^3]	$3.4289 \cdot 10^{-10}$	$2.9703 \cdot 10^{-10}$
Módulo de Young E_1 [MPa]	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$
Coeficiente de Poisson	0.499	
Parámetro N_1	[0.0015-0.2]	
Parámetro V_2	[0.001-0.2]	
Parámetro E_2 [MPa]	[0.6- $2 \cdot 10^4$]	
Parámetro N_2	[$6 \cdot 10^{-4}$ -0.008]	

Tabla 18. Propiedades del material tipo "viscous_foam" de las muestras.

Con este modelo de material si se lograron unas energías cercanas a las obtenidas en los ensayos experimentales. Dichas energías se presentan más adelante [Figura 84].



CAPÍTULO 6

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos de las diversas pruebas realizadas con el software específico *LS-Dyna*. Como se ha explicado previamente, se han realizado dos estudios en función del tipo de material.

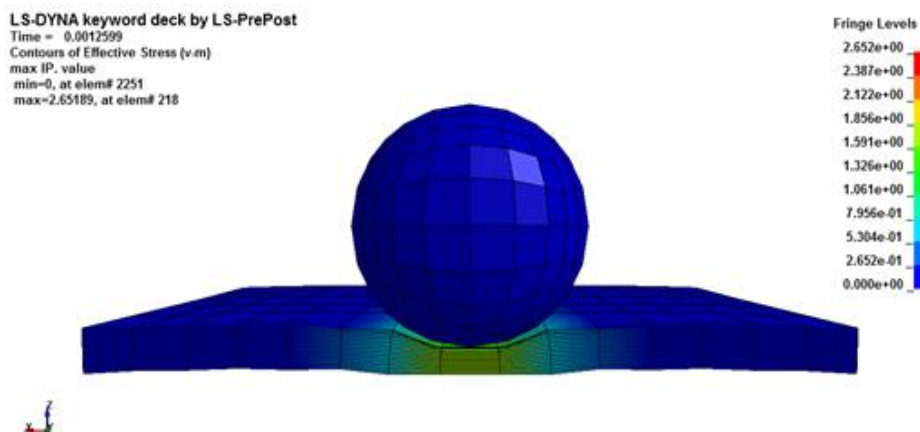
El primer estudio se realizó con el material “*Mooney Rivlin Rubber*”, en el que se simularon los impactos de caída libre realizados experimentalmente con los rodamientos de bolas. Este modelo de material presenta un comportamiento frente a la compresión muy similar al producido en el experimento real.

La segunda simulación se hizo con el material “*Viscous Foam*”, donde se representaron los impactos de la torre de caída de peso Ceast–Fractovis. Este modelo de material reproduce de manera aproximada la capacidad de absorción de energía de las muestras reales.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de ambos materiales:

6.2 MODELO MATERIAL MOONEY RIVLIN RUBBER

- Placa Poron 20236-65, bola 30mm



$$h=0,5m, v=3130mm/s$$

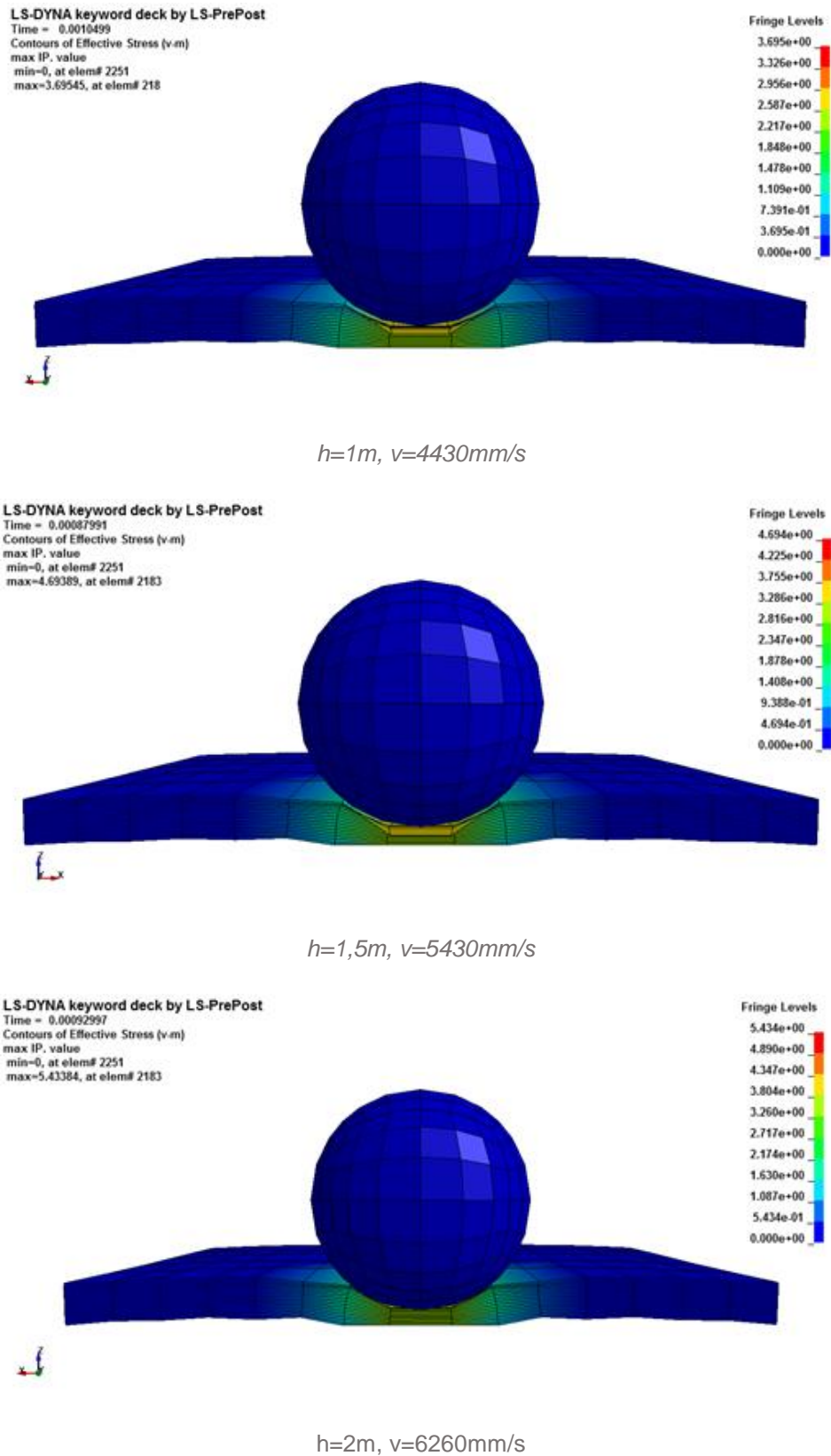
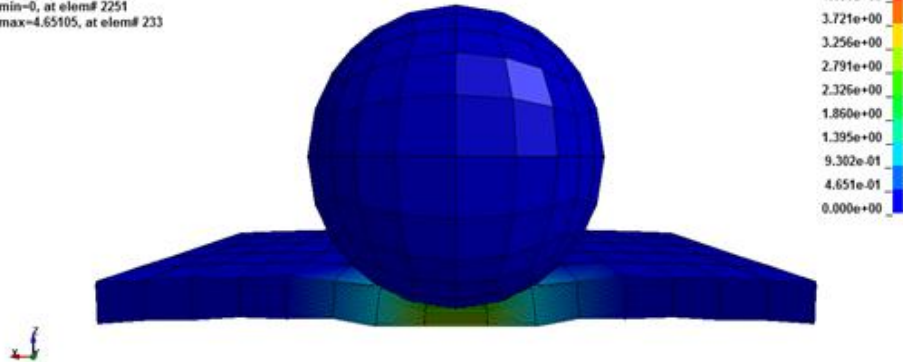


Figura 80. Representación de las tensiones de Von Mises en el corte transversal del Poron 20236-65, al incidir la bola de 30mm.

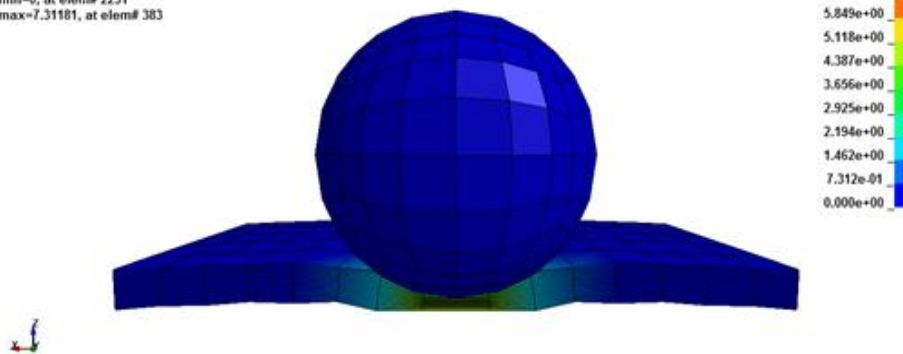
◦ **Placa Poron 20236-65, bola 40mm**

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.0015899
Contours of Effective Stress (v.m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=4.65105, at elem# 233



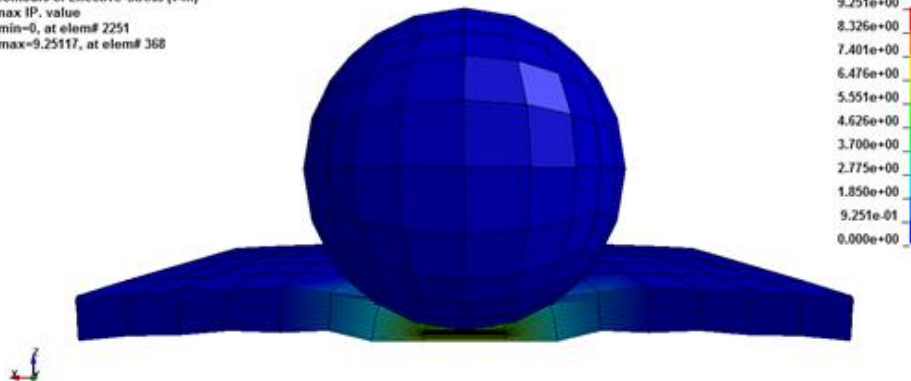
$h=0,5m$, $v=3130mm/s$

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.0012
Contours of Effective Stress (v.m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=7.31181, at elem# 383



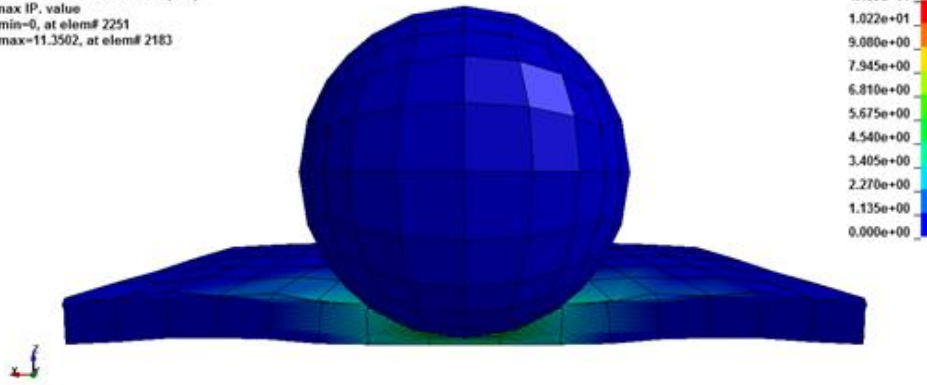
$h=1m$, $v=4430mm/s$

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.0010799
Contours of Effective Stress (v.m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=9.25117, at elem# 368



$h=1,5m$, $v=5430mm/s$

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00094996
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=11.3502, at elem# 2183

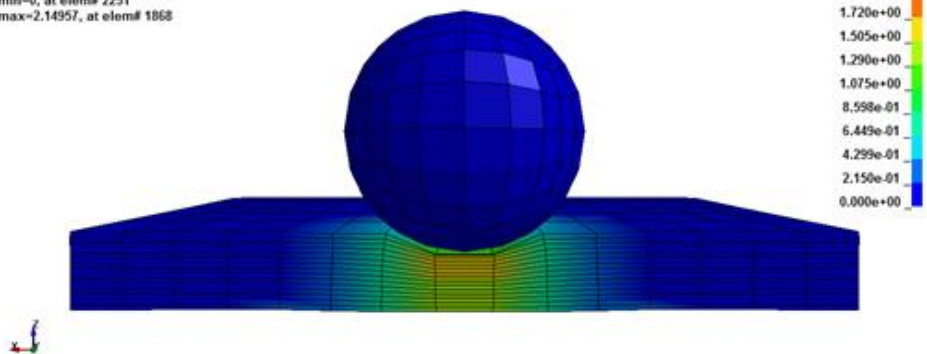


$h=2m$, $v=6260mm/s$

Figura 81. Representación de las tensiones de Von Mises en el corte transversal del Poron 20236-65, al incidir la bola de 40mm.

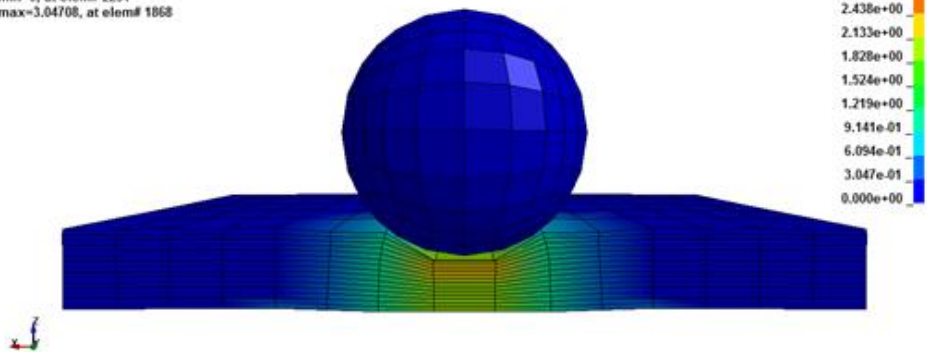
- Placa Poron XED 09625-65, bola 30mm

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00133
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=2.14957, at elem# 1868



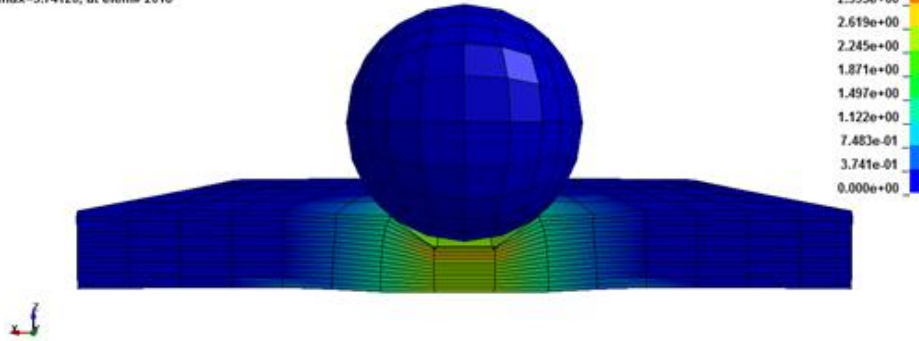
$h=0,5m$, $v=3130mm/s$

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00114
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=3.04708, at elem# 1868



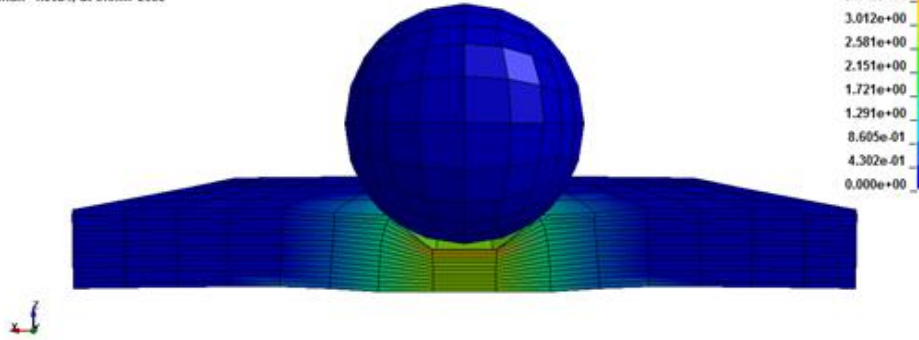
$h=1m$, $v=4430mm/s$

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.0011099
Contours of Effective Stress (v.m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=3.74126, at elem# 2018



$h=1,5m$, $v=5430mm/s$

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.0010399
Contours of Effective Stress (v.m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=4.3024, at elem# 2033

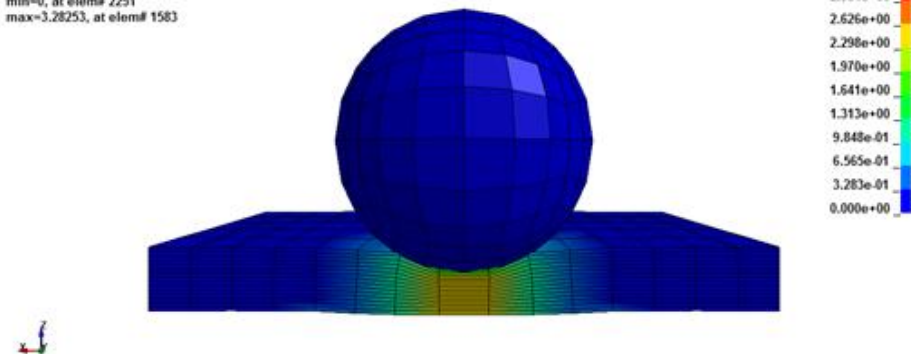


$h=2m$, $v=6260mm/s$

Figura 82. Representación de las tensiones de Von Mises en el corte transversal del Poron XED 09626-65, al incidir la bola de 30mm.

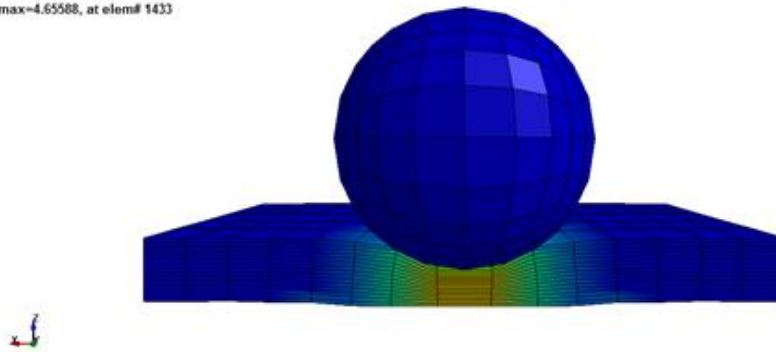
- Placa Poron XED 09625-65, bola 40mm

Time = 0.00168
Contours of Effective Stress (v.m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=3.28253, at elem# 1583



$h=0,5m$, $v=3130mm/s$

Time = 0.0014699
Contours of Effective Stress (v.m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=4.65588, at elem# 1433

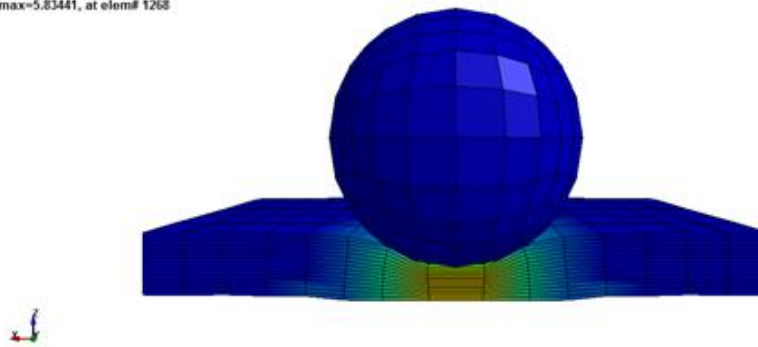


Fringe Levels

4.656e+00
4.190e+00
3.725e+00
3.259e+00
2.794e+00
2.328e+00
1.862e+00
1.397e+00
9.312e-01
4.656e-01
0.000e+00

$h=1m$, $v=4430mm/s$

Time = 0.0013199
Contours of Effective Stress (v.m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=5.83441, at elem# 1268

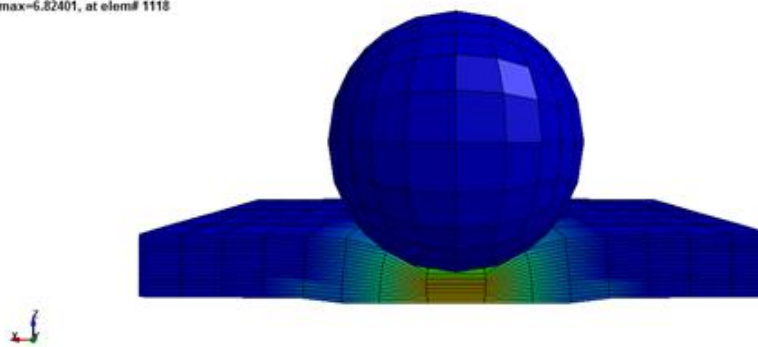


Fringe Levels

5.834e+00
5.251e+00
4.668e+00
4.084e+00
3.501e+00
2.917e+00
2.334e+00
1.750e+00
1.167e+00
5.834e-01
0.000e+00

$h=1,5m$, $v=5430mm/s$

Time = 0.0012499
Contours of Effective Stress (v.m)
max IP. value
min=0, at elem# 2251
max=6.82401, at elem# 1118



Fringe Levels

6.824e+00
6.142e+00
5.459e+00
4.777e+00
4.094e+00
3.412e+00
2.730e+00
2.047e+00
1.365e+00
6.824e-01
0.000e+00

$h=2m$, $v=6260mm/s$

Figura 83. Representación de las tensiones de Von Mises en el corte transversal del Poron XED 09626-65, al incidir la bola de 40mm.

Como se puede observar en las anteriores imágenes de las simulaciones de caída libre con el material “*Mooney Rivlin Rubber*” (Figura 80, Figura 81, Figura 82 y Figura 83), la indentación de los rodamientos de bolas sobre las muestras es semejante a la conducta apreciada en los ensayos experimentales. Las muestras se comprimen y flectan de manera que distribuyen la fuerza de impacto sobre todo el volumen material, hasta alcanzar de nuevo el estado inicial sin deformación.

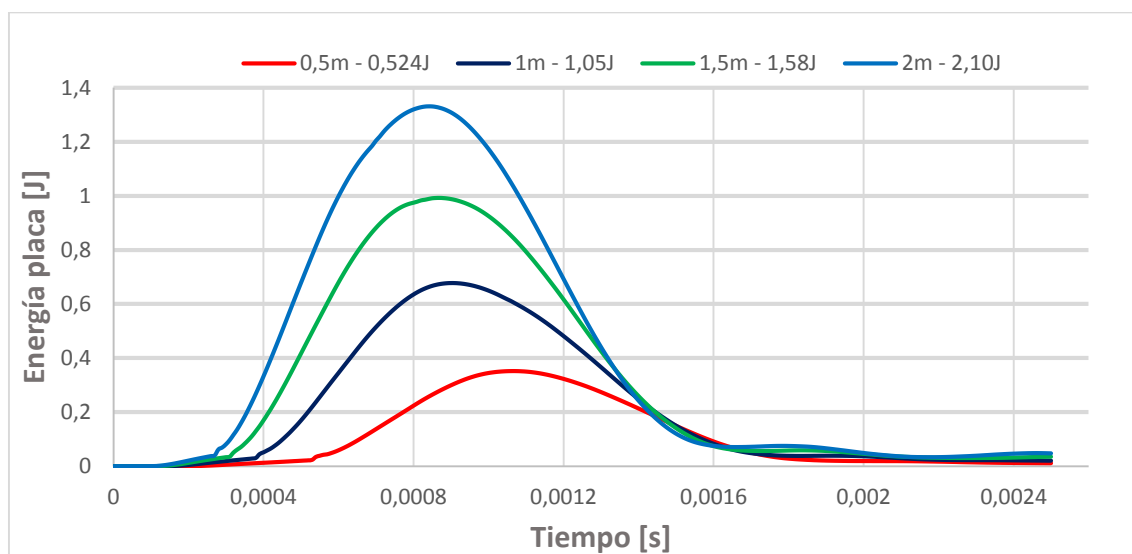


Figura 84. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron 20236-65 en los distintos impactos de la bola de 30mm.

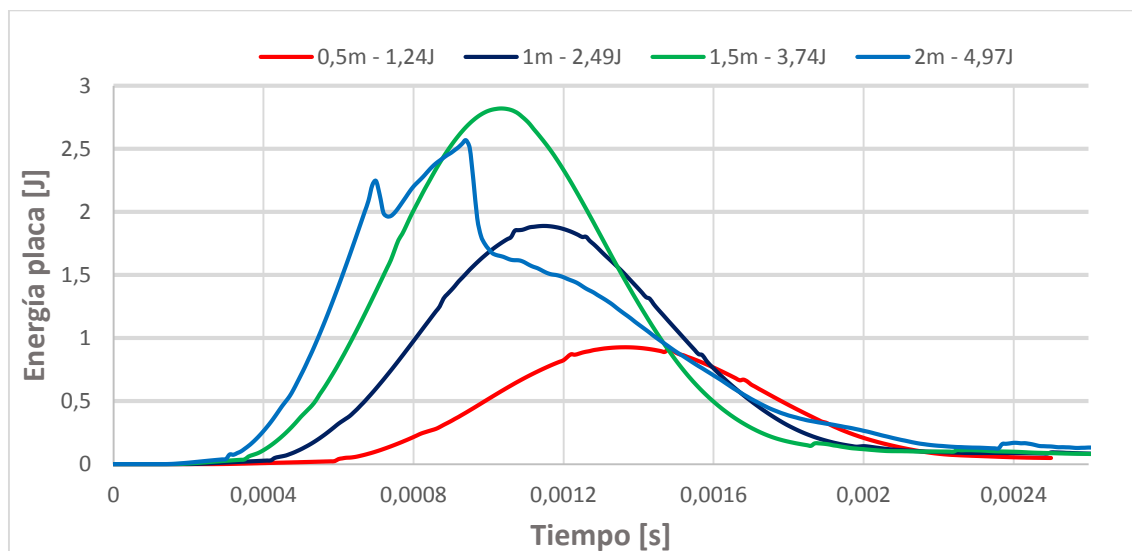


Figura 85. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron 20236-65 en los distintos impactos de la bola de 40mm.

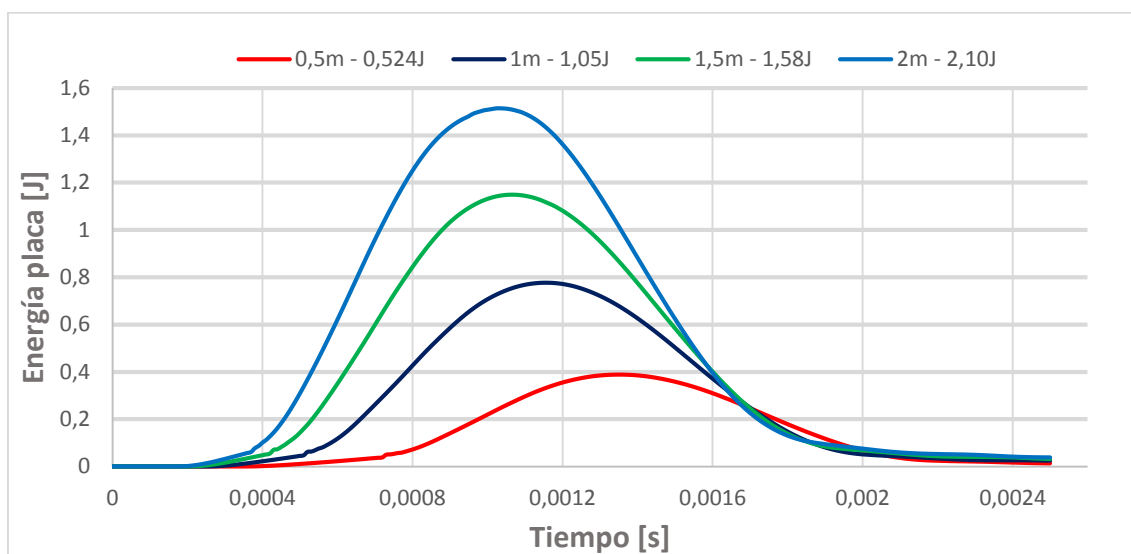


Figura 86. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron XED 09625-65 en los distintos impactos de la bola de 30mm.

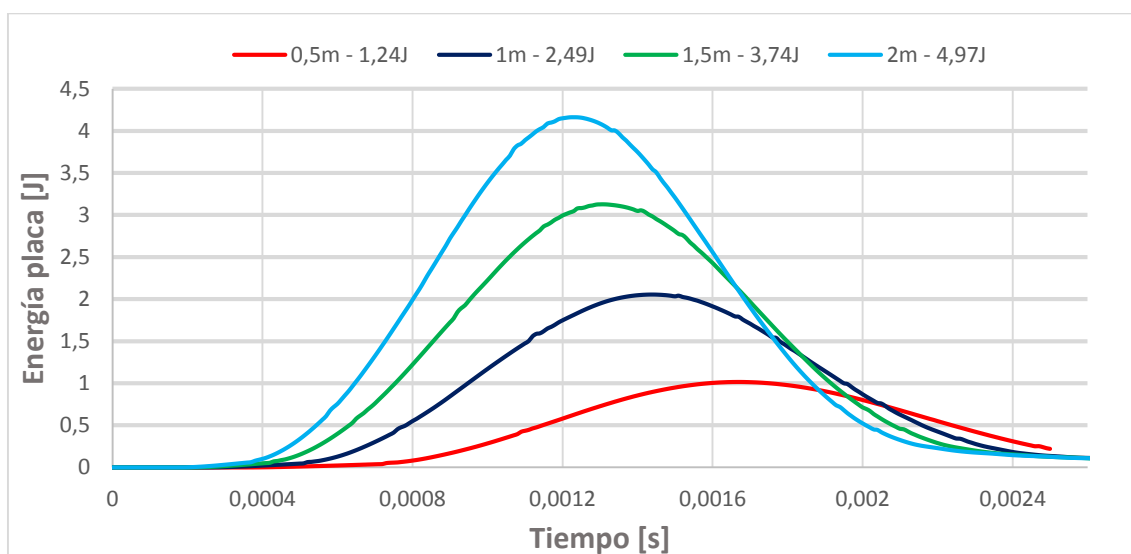


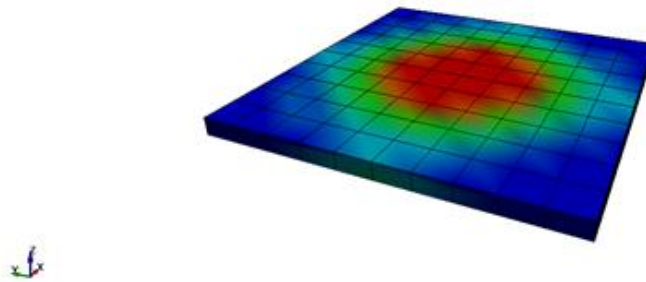
Figura 87. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron XED 09625-65 en los distintos impactos de la bola de 40mm.

En las gráficas anteriores (Figura 84, Figura 85, Figura 86 y Figura 87), se aprecia el comportamiento de este tipo de material ante los impactos. Dicho comportamiento no corresponde ni recuerda a las curvas obtenidas en los ensayos experimentales, donde la tendencia en la energía absorbida por las muestras era casi lineal tras alcanzar el valor máximo de absorción.

6.3 MODELO MATERIAL VISCOUS FOAM

Placa Poron 20236-65

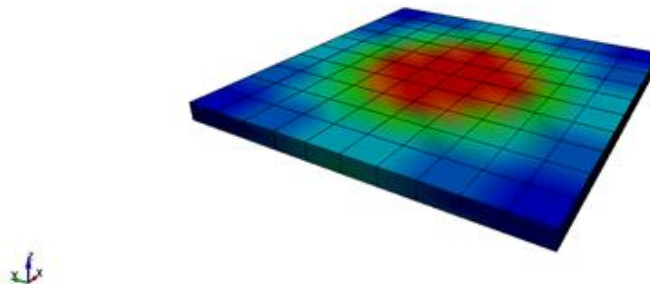
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.0014
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1001
max=34.7449, at elem# 37



Fringe Levels
3.474e+01
3.127e+01
2.780e+01
2.432e+01
2.085e+01
1.737e+01
1.390e+01
1.042e+01
6.949e+00
3.474e+00
0.000e+00

Ensayo de 1 julio

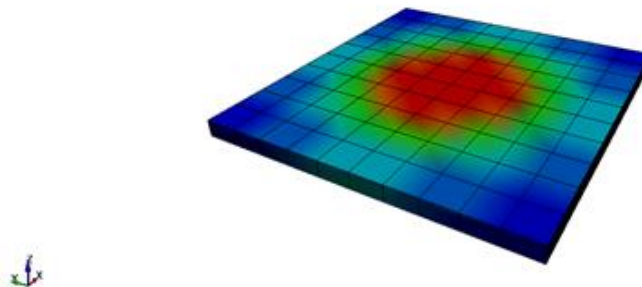
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00083
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1001
max=56.8756, at elem# 34



Fringe Levels
5.688e+01
5.119e+01
4.550e+01
3.981e+01
3.413e+01
2.844e+01
2.275e+01
1.706e+01
1.138e+01
5.688e+00
0.000e+00

Ensayo de 3 julios

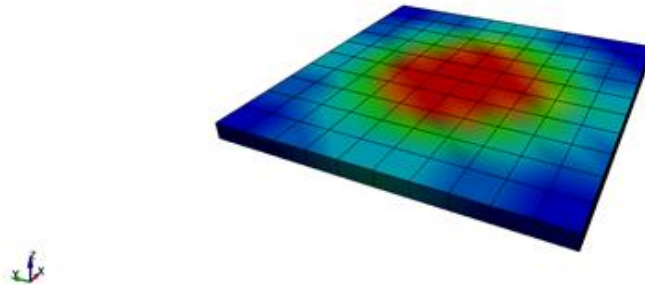
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00065
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1001
max=74.7132, at elem# 37



Fringe Levels
7.471e+01
6.724e+01
5.977e+01
5.230e+01
4.483e+01
3.736e+01
2.989e+01
2.241e+01
1.494e+01
7.471e+00
0.000e+00

Ensayo de 5 julios

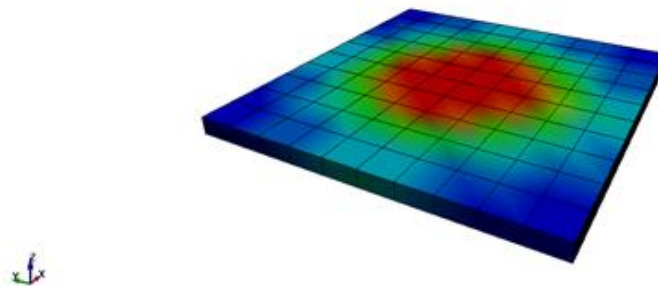
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00055
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1001
max=89.3572, at elem# 37



Fringe Levels
8.936e+01
8.042e+01
7.149e+01
6.255e+01
5.361e+01
4.468e+01
3.574e+01
2.681e+01
1.787e+01
8.936e+00
0.000e+00

Ensayo de 7 julios

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00046
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1001
max=107.062, at elem# 67



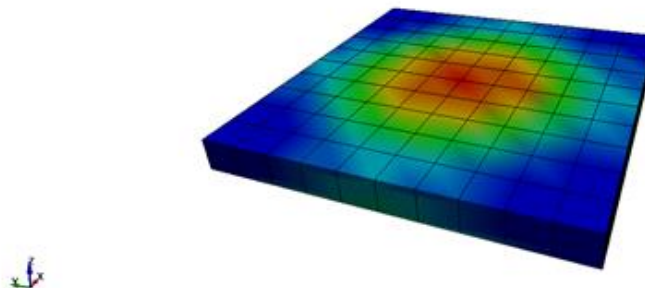
Fringe Levels
1.071e+02
9.636e+01
8.565e+01
7.494e+01
6.424e+01
5.353e+01
4.282e+01
3.212e+01
2.141e+01
1.071e+01
0.000e+00

Ensayo de 10 julios

Figura 88. Representación de las tensiones de Von Mises en vista isométrica del Poron 20236-65, en el impacto del percutor sobre él.

◦ Placa Poron XED 09625-65

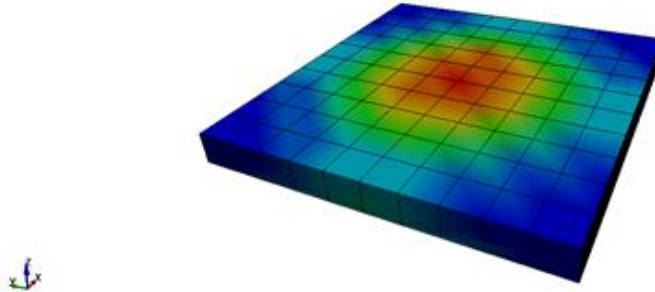
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.0014
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1401
max=30.9221, at elem# 1255



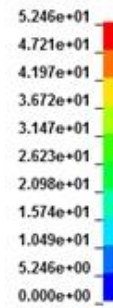
Fringe Levels
3.092e+01
2.783e+01
2.474e+01
2.165e+01
1.855e+01
1.546e+01
1.237e+01
9.277e+00
6.184e+00
3.092e+00
0.000e+00

Ensayo de 1 julio

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00083
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1401
max=52.4582, at elem# 1345

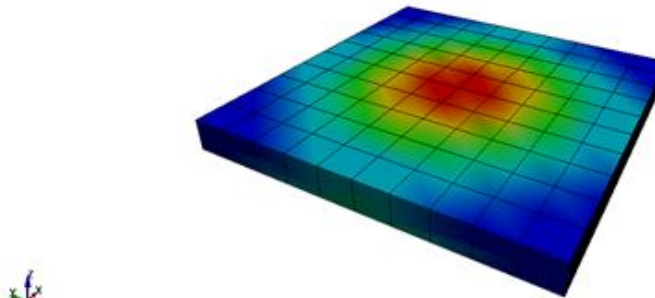


Fringe Levels

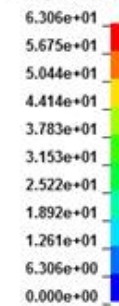


Ensayo de 3 julios

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00066
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1401
max=63.0561, at elem# 35

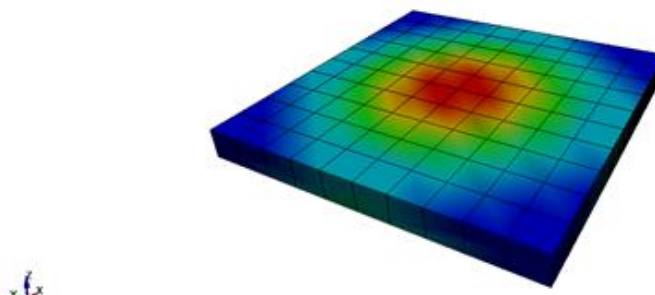


Fringe Levels

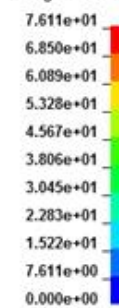


Ensayo de 5 julios

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00056
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1401
max=76.1144, at elem# 57

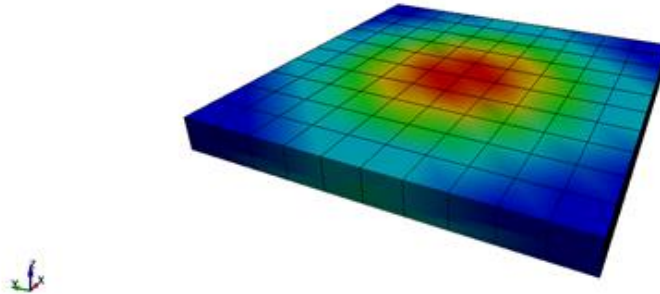


Fringe Levels



Ensayo de 7 julios

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00047
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1401
max=94.0339, at elem# 57

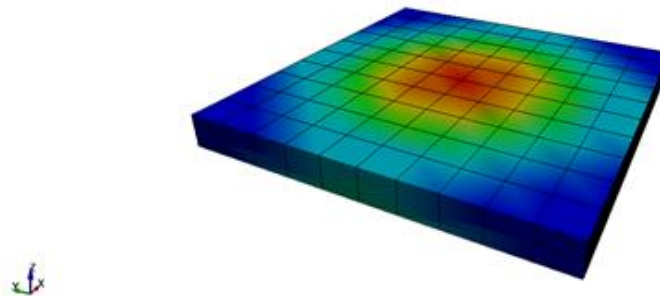


Fringe Levels



Ensayo de 10 julios

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.00039
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 1401
max=115.643, at elem# 1245



Fringe Levels



Ensayo de 15 julios

Figura 89. Representación de las tensiones de Von Mises en vista isométrica del Poron XED 09625-65, en el impacto del percutor sobre él.

En las imágenes anteriores (*Figura 88* y *Figura 89*), aparecen las tensiones de Von Mises de las dos muestras frente al impacto del percutor. Las muestras simuladas no se comportan de manera deseada con respecto a lo esperado, ya que en este tipo de material no se aprecia un desplazamiento aparente de la superficie superior por el impacto. El material Poron 20236-65 se comprimió $\delta_z = 0.042$ mm en el ensayo de 10 julios, y el Poron XED-09625-65 $\delta_z = 0.06$ mm en el ensayo de 15 julios.

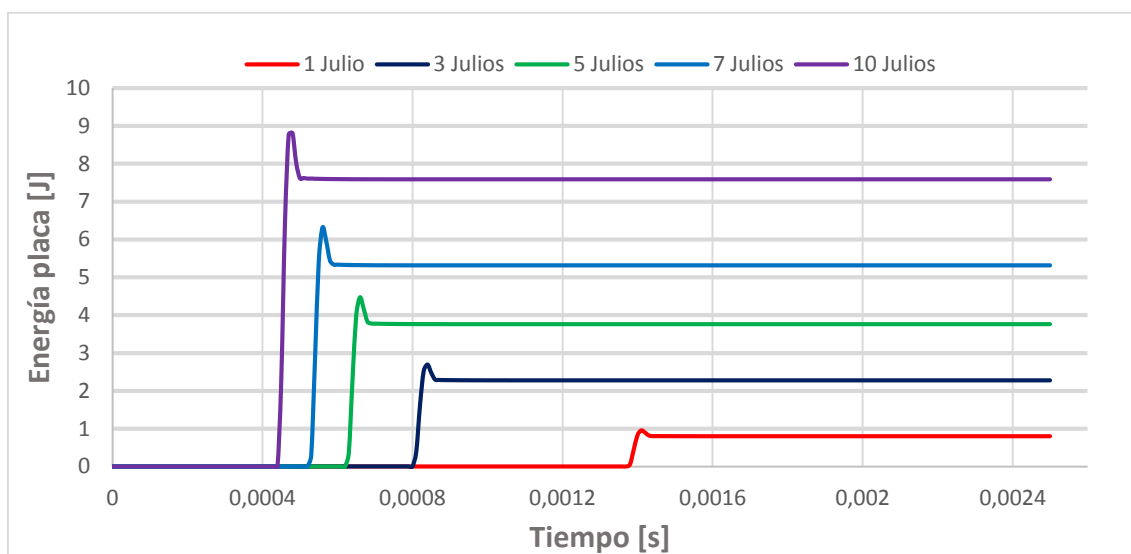


Figura 90. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron 20235-65 en cada energía simulada.

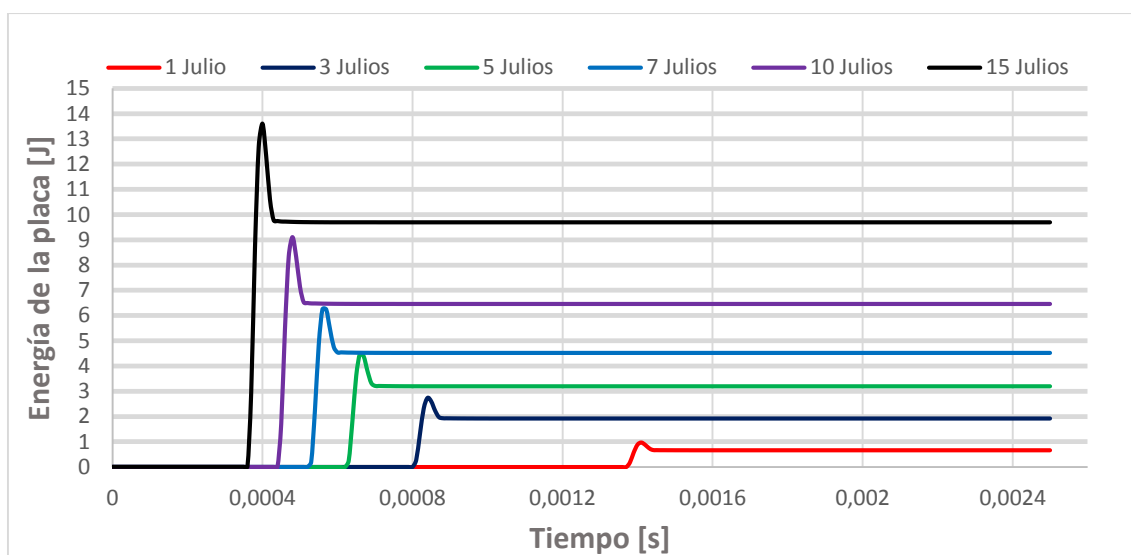


Figura 91. Gráfica de energía absorbida por la muestra de Poron XED 09625-65 en cada energía simulada.

Las gráficas anteriores demuestran que este tipo de material se asemeja considerablemente más a comportamiento absorbente de las muestras reales (Figura 90 y Figura 91). Esta conducta similar es más apreciable en los ensayos de 1,3 y 5 Julios, donde la energía absorbida es casi idéntica a las adquiridas en los ensayo experimentales.

A medida que la energía de impacto aumenta, se pierde capacidad de absorción y amortiguamiento del impacto, debido fundamentalmente a poseer baja viscosidad, y por consiguiente a la ausencia de deformación que sufren las placas.

6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como hemos podido observar en el apartado anterior, los materiales no presentan un comportamiento ni las propiedades que se requerían para asegurar su validez como modelo material de las espumas de poliuretano Poron.

Primeramente, el modelo material Mooney Rivlin es capaz de simular con gran realismo la respuesta frente a impacto las muestras ensayadas, logrando una flexión y compresión muy similar sobre todo el volumen material. En cambio, este modelo no representaba las propiedades de los especímenes, siendo la energía absorbida en los impactos la cualidad más característica de las placas Poron.

Por otro lado, el modelo Viscous Foam simuló con una aproximación suficientemente admisible la energía absorbida por las muestras. Esta aproximación fue mayor para valores de energía menores de 7 julios, de modo que a medida que esta aumentaba, la energía absorbida se veía reducida considerablemente. Este hecho no sucedía en los ensayos experimentales realizados, donde la capacidad de absorción permanecía inalterada e incluso aumentaba en las sucesivas energías de ensayo, superando el 90% de absorción.

Otro aspecto importante a mencionar en este modelo de material es su rigidez. El hecho de tener una baja viscosidad hizo que las muestras no se deformasen como era esperado. El comportamiento frente a compresión fue muy limitado, de manera que las muestras simuladas apenas sufrían una deformación visible, salvo en las energías máximas de ensayo realizadas a cada muestra (10 [J] en el Poron 20236-65 y 15 [J] en el Poron XED-09625-65).

Por estas razones, se puede decir que ambos modelos de materiales no son recomendables para realizar futuras simulaciones de espumas de poliuretano como la estudiada, a partir del uso de las variables predefinidas en cada tipo de modelo.



CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes de este proyecto fin de grado son las siguientes:

- Podemos asegurar un comportamiento más rígido en el Poron 202365-65 frente al Poron XED-09625-65 debido a los espesores que poseen, aunque los límites elásticos no lo reflejen de esta manera.
- Para energías de impacto menores que la energía umbral de las muestras, los datos adquiridos por la torre de caída no son representativos de la realidad.
- Se ha analizado la relación entre la energía absorbida en el impacto con la energía de dicho impacto. Se aprecia una tendencia progresiva de la energía que se logra absorber conforme aumenta la energía de impacto.
- La incorporación de distintos análisis de video al estudio aporta una solución diferente para estudiar el comportamiento experimental de las muestras en un ensayo de impacto. En este estudio ha sido necesario realizar un ajuste de los datos de los videos para poder compararlos con los obtenidos con la torre de caída, y poder así validar dichos datos.
- Pese no haber conseguido unos resultados óptimos en la simulación numérica de *LS-Dyna*, en el modelo de espuma viscosa (viscous foam) se ha determinado la importancia del valor del límite elástico y de la viscosidad de las muestras con respecto a la energía absorbida en el impacto. En este modelo, se han simulado las muestras con los diferentes módulos Young obtenidos en los ensayos experimentales, y se ha modificado el coeficiente viscoso de cada material Poron para lograr una mejor aproximación con la realidad. De esta manera, cuanto menor sea el límite elástico o mayor viscosidad, dentro de unos valores razonables, la energía absorbida aumenta.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

Debido a los problemas y dificultades encontrados en la realización del proyecto, el trabajo realizado ha abierto nuevas líneas de trabajo futuro. Como posibles trabajos futuros que lograrían extender el estudio realizado en este proyecto fin de grado, se proponen los siguientes:

- Realizar impactos de mayor energía e incluir régimen plástico y situaciones de rotura.
- Realizar un estudio sobre la influencia de la geometría y masa del proyectil en la fuerza producida por el impacto en la torre de caída de peso.
- Efectuar un trabajo de análisis y ajuste entre los ensayos experimentales y las simulaciones en *LS-Dyna* para lograr una correlación adecuada.
- Implementar modelos de comportamiento hiperelástico más exactos en el software *LS-Dyna*.
- Elaborar un estudio teórico analítico que corrobore los datos calculados en los ensayos experimentales.
- Desarrollar diferentes tipos de ensayo experimental, como un estudio de la elongación y rotura de la por tracción.
- Realización de ensayos con sistemas multicomponentes, de manera que se verificase la disposición más eficiente.
- Considerar otros tipos de materiales con características similares.

7.3 PRESUPUESTO DEL PROYECTO

En este apartado se van a desglosar los costes aproximados que habría supuesto la realización de un proyecto de estas características (*Tabla 19*). En el presupuesto se incluyen los costes personales, materiales e indirectos.

- En los costes personales se supone un gasto mensual de 1800 € del salario percibido por el ingeniero. Como la dedicación diaria no ha sido de 8 horas, se estima un 60% de la jornada laboral completa durante un período aproximado de 6 meses.
- En cuanto a los costes materiales utilizados está formado por un ordenador, la licencia del software específico *LS-Dyna*, el alquiler del laboratorio con instrumentación específica y el precio de las muestras ensayadas.
- Los costes indirectos están compuestos de gastos tales como la luz, el internet o los materiales de oficina y encuadernación, que ascienden a un 20% del total.

Para obtener los costes del proyecto se aplicará la siguiente formula de amortización:

$$C_t = \frac{t_n}{t_a} \cdot C \cdot r \quad (6.1)$$

Dónde: C_t es el coste total.

t_n es el tiempo requerido para la realización del proyecto [meses].

t_a es el período de depreciación [meses].

C es el coste material.

r es el porcentaje de dedicación.

En los equipos informáticos se ha tomado un período de desvalorización de 60 meses, y en la licencia de *LS-DYNA* de 12 meses. De esta manera, para el porcentaje de uso otorgado al proyecto, se ha considerado las horas de trabajo diarias, siendo estas el 60% de 8 horas. Esto son 4,8 horas, de modo que esto equivale al 20% del día.

GASTOS DE PERSONAL

Personal	Categoría	Salario mensual [€]	Dedicación [meses]	Dedicación [%]	Coste total [€]
1	Ingeniero	1800	6	60	6480

GASTOS DE MATERIALES

Equipo	Coste [€]	Periodo de devaluación [meses]	Dedicación [meses]	Dedicación [%]	Coste total [€]
CPU	1000	60	6	20	20
Licencia académica LS-Dyna	1000	12	6	20	100
Alquiler de laboratorio durante medio día					200
Espumas de uretano Poron					52

	Gastos	Euros
Balance	Personal	6480
de	Materiales	372
	Indirectos (20%)	1371
costes	TOTAL (sin I.V.A.)	8223

Tabla 19. Presupuesto del proyecto.

El presupuesto total del proyecto asciende a una cantidad de **ocho mil doscientos veintitrés euros**.



CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFÍA

1. **Association of plastics manufacturers.** www.plasticseurope.org. [En línea] [Citado el: 23 de Septiembre de 2015.] <http://www.plastval.pt/conteudos/File/Publicacoes/Plastics%20-%20the%20Facts%202014.pdf>.
2. **Plastics Europe Market Research Group, PEMRG.** Plastics Europe . [En línea] [Citado el: 23 de Septiembre de 2015.] <http://www.plasticseurope.es/>.
3. **John William Hill, Doris K. Kolb.** Química para el nuevo milenio. s.l. : Pearson Educación, 1999, pág. 530.
4. **OÑATE IBAÑEZ DE NAVARRA, EUGENIO.** *CALCULO DE ESTRUCTURAS POR METODO DE ELEMENTOS FINITOS (2ª ED.)*. s.l. : UPC, 2004. ISBN 9788487867002.
5. **Cooper, Daniel E. Heath and Stuart L. A** - *Polyurethanes*. s.l. : Academic Press, 2013. págs. 79 - 82. ISBN 9780123746269.
6. **Brydson, J.A.** 27 - *Polyurethanes and Polyisocyanurates, In Plastics Materials (Seventh Edition)*. s.l. : .A. Brydson, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999. págs. 778 - 809. ISBN 9780750641326.
7. **Focus on Surfactants.** *Momentive uses Cargill's Biobased BiOH Polyols in collaboration to improve sustainability of polyurethane foam*. s.l. : C. Edser, 2010. págs. 5 - 6. Vols. Volume 2010, Issue 12. ISSN 1351-4210.
8. **Poron XRD.** Poron XRD. [En línea] [Citado el: 23 de Septiembre de 2015.] <http://poronxrd.com/howitworks/charts.aspx>.
9. **Stefan Schwanitz, Sebastian Mösera, Stephan Odenwalda.** *Comparison of Test Methods to Quantify Shock Attenuating*. s.l. : Procedia Engineering, 2010. ISSN 1877-7058.
10. **Karoline Brückner, Stephan Odenwald, Stefan Schwanitz, Jens Heidenfelder, Thomas Milani.** *Polyurethane-foam midsoles in running shoes - impact energy and damping*. s.l. : Procedia Engineering, 2010. págs. 2789-2793. ISSN 1877-7058.
11. **Andy Bryson, Lloyd Smith.** *Impact response of sports materials*. s.l. : Procedia Engineering, 2010. págs. 2961-2966. ISSN 1877-7058.
12. **M.A Rodríguez Chacón, P.J. Astola González, R. Páez Vera, F.J. Botana Pedemonte, L. González Rovira.** *Caracterización de elementos de protección fabricados en composite mediante análisis extensiométrico*. s.l. : Asociación Española de Materiales Compuestos, AEMAC, 2015. págs. 1195 - 1200. ISBN 978-84-697-0406-6.
13. **N.J. Mills, C. Fitzgerald, A. Gilchrist, R. Verdejo.** *Polymer foams for personal protection: cushions, shoes and helmets*. s.l. : Composites Science and Technology, 2003. págs. 2389-2400. ISSN 0266-3538.
14. **Canseco de la Cruz Rene Alejandro, Camarillo Gómez Karla Anhel, Silva Moreno Alejandra, Lesso Arroyo Raúl.** *Experimentación y Análisis por MEF del Comportamiento Hiperelástico en Materiales usados en Calzado Deportivo*. s.l. : Centro de Investigaciones Avanzadas en Tecnologías Competitivas, CIATEC, 2011.

15. **ASTM.** *Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials—Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams.* s.l. : ASTM INTERNATIONAL.
16. **8307:2008, UNE-EN ISO.** *Materiales poliméricos celulares flexibles. Determinación de la resiliencia por bola rebotante. (ISO 8307:2007).* s.l. : AEN/CTN 53 - PLÁSTICOS Y CAUCHO, 2008.
17. **Herrenbrück, Martin Johannes.** *Finite-Element Based Determination of Response Spectra of Viscoelastic Materials Subjected to Low-Velocity Impact Loading.* s.l. : TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 2013. págs. 10 - 18.
18. **J. De Lamo Arango, J. Zahr Viñuela.** *VISCOELASTICIDAD.* s.l. : DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTÍNUOS Y TEORÍA - UNIVERSIDAD CARLOS III, 2014.
19. **Estrada Barbosa Quirino, Szwedowicz Wasik Dariusz, Majewski Szymiec Tadeusz, Bedolla Hernández Jorge.** *PROCEDIMIENTO NUMÉRICO PARA EL MODELADO DE MATERIALES HIPERELÁSTICOS SOMETIDOS A TENSIÓN.* s.l. : Departamento de Ingeniería Industrial y Mecánica - Universidad de las Américas-Puebla, 2013.
20. **R.A. González Carbonell, E. Álvarez García, J. L. Moya Rodríguez, K. Abreu González.** *Modelos de materiales hiperelásticos para el análisis de los elastómeros usando el MEF.* s.l. : Facultad de Ingeniería Mecánica - Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría-Cujae, 2009.
21. **L. Sánchez. F. Gutiérrez-Solana, J. Fordeyn, S. Verstraeten.** *Relación entre resiliencia y tenacidad a fractura en aceros inoxidables "duplex" envejecidos a baja temperatura.* s.l. : Departamento de ciencias e ingeniería de la tierra, el terreno y los materiales E.T.S. de ingenieros de caminos, canales y puertos - Universidad de Cantabria, 1994.
22. **Ivárez del Pozo, Inés.** *Análisis y modelización de vigas sándwich sometidas a impactos de baja velocidad.* Madrid : DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTÍNUOS Y TEORÍA - Universidad Carlos III, 2013.
23. **TecnOficio.** [En línea] [Citado el: 23 de Septiembre de 2015.] <http://www.tecnoficio.com/docs/doc58.php>.
24. **Photron.** [En línea] [Citado el: 23 de Septiembre de 2015.] http://www.photron.com/datasheet/ultima_APX-RS.pdf.
25. **ARRI.** [En línea] [Citado el: 23 de Septiembre de 2015.] <http://www.videocineimport.com/archivos/201310/arri-m-series.pdf>.
26. **López Paredes, Héctor.** *Detección y seguimiento de objetos con cámaras en movimiento.* s.l. : Departamento de Ingeniería Informática - Universidad Autónoma de Madrid, 2011.
27. **LS-PrePost.** *LS-PrePost Online Documentation.* [En línea] [Citado el: 23 de Septiembre de 2015.] <http://www.lstc.com/lspg/content/tutorials.shtml>.